

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE INESTABILIDADES PLÁSTICAS EN PROBETAS METÁLICAS SOMETIDAS A TRACCIÓN DINÁMICA



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Departamento de medios continuos y teoría de estructuras

Grado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO FIN DE GRADO

REALIZADO POR:

CARLOS SERRANO BAYÁN

TUTOR RESPONSABLE:

JOSÉ ANTONIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecerse a mis padres, Ángel y Juani, y a mi hermano, Álvaro, por todo el apoyo que he tenido durante estos cinco años, y gracias a ellos he podido hacer una carrera.

A Marta García Ramos, por todo, por aguantar todos los momentos de tensión, y aguantarme en exámenes, la mitad del proyecto es tuyo ya que sin ti no hubiese sido posible llevarlo a cabo.

A José Antonio Rodríguez, tutor del proyecto, por toda la ayuda que he tenido, por su confianza y paciencia que ha tenido para que el proyecto finalizara.

A los compañeros y amigos de la Universidad por todos esos ratos que hemos pasado y pasaremos, ya que sin ellos hubiese sido muy difícil terminar la carrera.

A los amigos de la residencia, en especial a Dani, por aguantar dos años conmigo y mantener siempre su puerta abierta, para descansar en los momentos de tensión en los exámenes.

A mis amigos de siempre, a los que conocía antes de empezar y que seguiré con ellos cuando acabe, a todos, por mantenerme siempre la sonrisa.

Por último quiero agradecer a todos los profesores de la Escuela Politécnica de la Universidad por su trato y apoyo durante estos cinco años. Gracias a ellos puedo decir que la elección de esta Universidad ha sido la acertada ya que he aprendido mucho de ellos y espero poder demostrarlo siempre. En especial al departamento de Teoría de Medios Continuos y Teoría de Estructuras por toda la ayuda que he recibido a la hora de hacer el proyecto.

ÍNDICE

RESUMEN	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2. MOTIVACIÓN	15
3. METODOLOGÍA Y OBJETIVOS.....	16
4. MODELO NUMÉRICO	19
4.1 CONDICIÓN DE CARGA	21
4.2 CONDICIÓN INICIAL.....	23
5. RESULTADOS: EL PAPEL DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS EN LA LOCALIZACIÓN DE LAS INESTABILIDADES.....	25
5.1 LOCALIZACIÓN DE INESTABILIDADES EN PROBETAS SIN ENTALLA ...	27
5.2 LOCALIZACIÓN DE INESTABILIDADES EN PROBETAS CON ENTALLA ..	36
5.2.1 PROBETAS CON ENTALLA DEL 10%, 9% Y 8%	36
5.2.2 PROBETA CON ENTALLA DESDE EL 7% HASTA EL 1%	39
5.3 OBSERVACIONES.....	49
6. RESULTADOS: EL PAPEL DE LA INERCIA EN LA LOCALIZACIÓN DE LAS INESTABILIDADES	54
6.1 LOCALIZACIÓN DE INESTABILIDADES EN PROBETAS SIN ENTALLA ...	55
6.2 LOCALIZACIÓN DE INESTABILIDADES EN PROBETAS CON ENTALLA..	61
6.2.1 PROBETAS CON ENTALLA DEL 10%, AL 7%	61
6.2.2 PROBETAS CON ENTALLA DEL 6%, AL 1%.....	64
6.3 OBSERVACIONES.....	67
7. DISCUSIÓN	73
8. CONCLUSIONES.....	80
9. TRABAJOS FUTUROS	81
10. REFERENCIAS	82

INDICE DE FIGURAS

FIG. 1.1 CONCENTRACIÓN DE TENSIONES DEBIDO A UN AGUJERO EN UNA PLACA UNIFORME.	13
FIG. 2.1 ALA DEL A-380.....	12
FIG. 2.2 CHASIS DEL MAZDA 3	15
FIG. 3.1 MODELO DE LA PROBETA UTILIZADA EN EL PROYECTO. COTAS EN MILÍMETROS	16
FIG. 4.1. MALLADO DE LA PROBETA.	20
FIG. 4.2. VELOCIDAD INTRODUCIDA EN LA PROBETA.	21
FIG. 4.3. VELOCIDAD PUNTUAL BAJO CONDICIÓN INICIAL.....	23
FIG. 4.4. CAMPOS DE VELOCIDAD BAJO CONDICIÓN INICIAL.....	23
FIG. 5.1. PROPAGACIÓN DE ONDA EN UNA PROBETA	25
FIG. 5.2 DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA SIN ENTALLA CON VELOCIDAD 10 M/S.....	27
FIG. 5.3 DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA SIN ENTALLA CON VELOCIDAD DE 8 M/S	28
FIG. 5.4 DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA SIN ENTALLA CON VELOCIDAD 1 M/S	28
FIG. 5.5. GRÁFICA Tensión DEFORMACIÓN PARA PROBETAS SIN ENTALLA.....	29
FIG. 5.6. Tensión A LO LARGO DE UNA PROBETA SIN ENTALLA A VELOCIDAD DE 10 M/S.....	30
FIG. 5.7. Tensión A LO LARGO DE UNA PROBETA SIN ENTALLA A VELOCIDAD DE 8 M/S.....	31
FIG. 5.8. Tensión A LO LARGO DE UNA PROBETA SIN ENTALLA A VELOCIDAD DE 1 M/S.....	31
FIG. 5.9. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA SIN ENTALLA A VELOCIDAD DE 10 M/S.....	32
FIG. 5.10. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA SIN ENTALLA A VELOCIDAD DE 8 M/S.....	32
FIG. 5.11. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA SIN ENTALLA A VELOCIDAD DE 1 M/S.	33
FIG. 5.12. GRÁFICA Tensión-DEFORMACIÓN A V=10 M/S.....	32
FIG. 5.13. GRÁFICA Tensión-DEFORMACIÓN A V=8 M/S.	35
FIG. 5.14. GRÁFICA Tensión-DEFORMACIÓN A V=5 M/S.....	32
FIG. 5.15. GRÁFICA Tensión-DEFORMACIÓN A V=1 M/S.	35
FIG. 5.16. GRÁFICA Tensión-DEFORMACIÓN A V=0.5 M/S.....	32
FIG. 5.17. GRÁFICA Tensión-DEFORMACIÓN A V=0.1.....	35
FIG. 5.18. DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 8% A VELOCIDAD DE 10 M/S.	36
FIG. 5.19. Tensión A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 8% PARA UNA VELOCIDAD DE 10 M/S.	37
FIG. 5.20. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 8% PARA UNA VELOCIDAD DE 10 M/S.	38
FIG. 5.21. GRÁFICA Tensión-DEFORMACIÓN PARA UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 8% A V=10M/S...38	
FIG. 5.22. DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 7% A UNA VELOCIDAD DE 10 M/S.	39
FIG. 5.23. DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 7% A UNA VELOCIDAD DE 8 M/S.	39
FIG. 5.24. Tensión A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 7% PARA UNA V=10 M/S.	40
FIG. 5.25. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 7% PARA UNA V= 10 M/S. 40	
FIG. 5.26. DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 6% A UNA VELOCIDAD DE 10 M/S.	42
FIG. 5.27. DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 6% A UNA VELOCIDAD DE 4 M/S	42
FIG. 5.28. DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 6% A UNA VELOCIDAD DE 3.75 M/S.	42
FIG. 5.29. Tensión A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 6% PARA UNA VELOCIDAD DE 4 M/S.	43
FIG. 5.30. Tensión A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 6% PARA UNA VELOCIDAD DE 3.75 M/S.....	44
FIG. 5.31. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 6% PARA UNA VELOCIDAD DE 4 M/S.	44

FIG. 5.32. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 6% PARA UNA VELOCIDAD DE 3.75 M/S.	45
FIG. 5.33. COMPARA DE LA DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 1% PARA DISTINTAS VELOCIDAD. COLOCADAS DE SUPERIOR A INFERIOR SON: 10 M/S, 8 M/S, 5 M/S, 1 M/S, 0.25 M/S Y 0,1 M/S.	46
FIG. 5.34. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 1% CON UNA VELOCIDAD DE 8 M/S.	47
FIG. 5.35. DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 1% PARA UNA VELOCIDAD DE 0.1 M/S.	48
FIG. 5.36. GRÁFICA DE TENSIÓN-DEFORMACIÓN PARA LAS VELOCIDAD DE 10 M/S Y 0.1 M/S.	48
FIG. 5.37. TENSIÓN EN UNA PROBETA SIN ENTALLA.	47
FIG. 5.38. TENSIÓN EN UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 1%.	47
FIG. 5.39. TENSIÓN DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 2%.	50
FIG. 5.40. TENSIÓN EN UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 6%.	47
FIG. 5.41. TENSIÓN EN UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 7%.	47
FIG. 5.42. TENSIÓN EN UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 8%.	50
FIG. 5.43. DEFORMACIÓN EN UNA PROBETA SIN ENTALLA.	48
FIG. 5.44. DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 1%.	48
FIG. 5.45. DEFORMACIÓN EN UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 2%.	51
FIG. 5.46. DEFORMACIÓN EN UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 6%.	48
FIG. 5.47. DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 7%.	48
FIG. 5.48. DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 8%.	51
FIG. 5.49. COMPARACIÓN DE LAS GRAFICAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN PARA UNA VELOCIDAD DE 10 M/S.	52
FIG. 5.50. COMPARACIÓN DE LAS GRÁFICAS TENSIÓN DEFORMACIÓN PARA UNA VELOCIDAD DE 1 M/S.	53
FIG. 6.1. DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA SIN ENTALLA CON VELOCIDAD 10 M/S.	55
FIG. 6.2. DEFORMACIÓN DE UNA PROBETA SIN ENTALLA CON V=5 M/S.	56
FIG. 6.3. TENSIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA SIN ENTALLA CON V=10 M/S.	57
FIG. 6.4. TENSIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA SIN ENTALLA CON V=1 M/S.	57
FIG. 6.5. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA SIN ENTALLA CON V=10 M/S.	58
FIG. 6.6. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA SIN ENTALLA CON V=1 M/S.	58
FIG. 6.7. GRÁFICA PARA UNA PROBETA CON V=10 M/S. FIG. 6.8. GRÁFICA PARA UNA PROBETA CON V=5 M/S.	59
FIG. 6.9. GRÁFICA TENSIÓN-DEFORMACIÓN PARA UNA PROBETA SIN ENTALLA CON V=1 M/S.	59
FIG. 6.10. COMPARACIÓN DE GRÁFICAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN PARA DISTINTAS VELOCIDADES. V=10 M/S, V=1M/S.	60
FIG. 6.11. DEFORMACIÓN EN UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 7% CON V=10 M/S.	61
FIG. 6.12. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE LA PROBETA CON ENTALLA DEL 7% CON V=10 M/S.	62
FIG. 6.13. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE LA PROBETA CON ENTALLA DEL 7% CON V=1 M/S.	62
FIG. 6.14. COMPARATIVA DE LAS GRÁFICAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN PARA UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 7%.	63
FIG. 6.15. DEFORMACIÓN EN UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 5% CON V=3 M/S.	64
FIG. 6.16. DEFORMACIÓN EN UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 5% CON V=10 M/S.	65
FIG. 6.17. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 5% CON v=10 M/S.	65
FIG. 6.18. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 5% CON v=3 M/S.	66
FIG. 6.19. COMPARACIÓN CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN EN PROBETAS CON ENTALLA DEL 5%.	66
FIG. 6.20. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA SIN ENTALLA CON V=10 M/S.	68
FIG. 6.21. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 5% CON v=10 M/S.	68
FIG. 6.22. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 6% CON V=10 M/S.	69
FIG. 6.23. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE LA PROBETA CON ENTALLA DEL 7% CON V=10 M/S.	69
FIG. 6.24. TENSIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA SIN ENTALLA CON V=10 M/S.	70
FIG. 6.25. TENSIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 5% CON V=10 M/S.	70
FIG. 6.26. TENSIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 6% CON V=10 M/S.	71

FIG. 6.27. TENSIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 7% CON $V=10$ M/S.	71
FIG. 6.28. COMPARATIVA DE LAS CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN CON $V=10$ M/S.	72
FIG. 7.1. VELOCIDAD MÁXIMA A LA QUE UNA PROBETA CON ENTALLA ROMPE POR LA MISMA.	74
FIG. 7.2. ZONAS DE ROTURA DE LA PROBETA.	75
FIG. 7.3. AUMENTO DE LA TENSIÓN EN PROBETAS CON CONDICIÓN INICIAL PARA UNA VELOCIDAD DE 10 M/S.	75
FIG. 7.4. AUMENTO DE LA TENSIÓN EN PROBETAS CON CONDICIÓN DE CARGA PARA UNA VELOCIDAD DE 10 M/S.	76
FIG. 7.5. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA 6% CON $V=10$ M/S.	77
FIG. 7.6. DEFORMACIÓN A LO LARGO DE UNA PROBETA CON ENTALLA DEL 3% CON $V=1$ M/S.	78
FIG. 7.7. CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN PARA PROBETA SIN ENTALLA CON $V= 1$ M/S.	79

INDICE DE TABLAS

TABLA. 3.1 TAMAÑO DE LA ENTALLA INTRODUCIDA FRENTE AL RADIO DE LA PROBETA	17
TABLA. 5.1. VELOCIDAD A LA QUE ROMPE POR LA ENTALLA EN LAS DISTINTAS PROBETAS.	49
TABLA. 6.1. VELOCIDAD A LA QUE ROMPE POR LA ENTALLA EN LAS DISTINTAS PROBETAS.	67

RESUMEN

El proyecto estudia la mecánica de formación de inestabilidades plásticas en probetas metálicas sometidas a tracción dinámica. Para ello se han realizado simulaciones numéricas mediante elementos finitos con el software comercial ABAQUS/Explicit.

Para el estudio se han tomado tanto probetas sin entalla como con entalla. La tracción dinámica consistirá en aplicar una velocidad bajo condiciones de carga o bajo condiciones iniciales.

Bajo condición de carga, las inestabilidades pueden aparecer en cualquier parte de la probeta, dependiendo de la velocidad de carga, que se debe a la propagación de ondas creada por una velocidad fija. Bajo condiciones iniciales, en las simulaciones, se observa que las inestabilidades se producen de manera simétrica, ya sea en el centro de la probeta, o en dos puntos a la misma vez, debido a una velocidad lineal.

Tanto para condiciones de carga como para condiciones iniciales, las simulaciones revelan que en probetas con entallas con una determinada velocidad, la localización de las inestabilidades puede producirse fuera de la entalla. Así, los resultados del proyecto manifiestan que la presencia de imperfecciones en probetas metálicas sometidas a determinadas cargas, no determina donde se localizan las inestabilidades y la posterior fractura de la probeta.

1. INTRODUCCIÓN

Los elementos estructurales presentan normalmente imperfecciones a lo largo de la superficie, que pueden ser debidas en general a dos factores:

- Por construcción y manipulación.
- Por inclemencias meteorológicas.

Estas imperfecciones se manifiestan de varias formas, como estrías, entallas, agujeros, o rozaduras, que tienden a que las tensiones se concentren en dichas imperfecciones. Al crearse una localización de tensiones puede provocar que la probeta se fracture antes de lo esperado.

El progreso hacia una definición de la concentración de tensiones comenzó con Inglis que, utilizando la teoría de la elasticidad, demostró que el aumento de tensión en el borde del orificio dependía del radio de curvatura (fig 1.1). En el *trabajo “Stresses in a plate due to the presence of cracks and Sharp corners” (1913)*, Inglis dio un factor de concentración de tensión para los defectos elípticos, siendo igual a:

$$k = 1 + 2\sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad \text{donde:}$$

“**c**” es el radio del orificio

“**p**” es el radio de curvatura del orificio.

Con esta ecuación, demostró que para un orificio elíptico con un radio de curvatura pequeño, el factor de concentración de tensiones puede ser mayor que uno, mientras que para un agujero circular, siempre será igual tres.

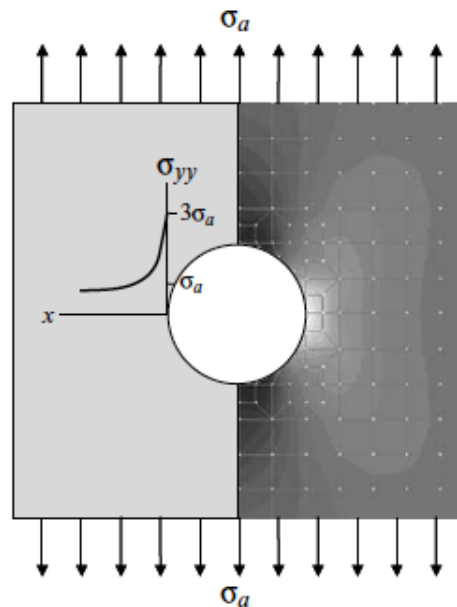


Fig. 1.1 Concentración de tensiones debido a un agujero en una placa uniforme.

Otro papel importante en el estudio de la concentración de tensiones en sus inicios lo tuvo Cocker con los trabajos *"The Effects of Holes and Semi-Circular Notches on the Distribution of Stress in Tension Members"*. (1912) y *"Photoelastic and strain measurements of the effects of circular holes on the distribution of stress in tension members"* (1919) estudiando los efectos de orificios, en cuerpos con tensión, durante la deformación.

Más tarde Neuber en *"Theory of notch stresses"* (1958) y Peterson en *"Stress-Concentration Phenomena in Fatigue of Metals"*. (1933) y *"Stress Concentration Design Factors"* (1953), estudiaron la predicción de fallos en componentes metálicos y desarrollaron un análisis que ayuda a describir el comportamiento de tensión-deformación no lineal en las entallas.

Nakayama en su trabajo *"Dynamic Stress concentration Factor in the Strip Plate with Fillet"* (1998), estudió los factores de concentración de tensiones, tanto dinámicos como estáticos con el método fotoelástico.

Los trabajos mas recientes que han estudiado los factores de concentración de tensiones son los de Strandberg *“Upper bounds for the notch intensity factor for some geometries and their use in general interpolation formulae.”* (2001) y Zappalort y Lazzarin *“Strain energy-based evaluations of plastic notch stress intensity factors at pointed V-notches under tensión”* (2011) que realizaron sus estudios en entallas en forma de V.

Muchos de estos trabajos se han desarrollado para determinar los factores de concentración de tensiones cuasi-estático en discontinuidades geométricas, sin embargo, aunque siempre ha existido una preocupación al aplicarse cargas con altas velocidades, nunca se ha estudiado para probetas con entallas bajo condiciones de tracción dinámica.

2. MOTIVACIÓN

El comportamiento de los materiales bajo solicitaciones dinámicas tiene un considerable interés, ya que permite dar respuesta a multitud de problemas de aplicación en campos como el de la ingeniería civil, militar, aeronáutica, naval y de automoción (fig. 2.1 y fig. 2.2). En particular, recientemente, se ha creado un interés especial en la mecánica de formación de inestabilidades en materiales con imperfecciones bajo condiciones dinámicas.

Las imperfecciones o entallas en una pieza es un tipo de concentrador de tensiones que no se tiene muy en cuenta a la hora de calcular el límite de tensión en la pieza, pero su efecto puede ser catastrófico. Un elemento puede llegar a la fractura aunque los esfuerzos que sufre la pieza no alcancen el límite elástico del material; esto puede producirse por un sobreesfuerzo aplicado en una zona localizada. La concentración de esfuerzos puede ser debida a cambios de sección en la pieza, entallas, chaveteros, o muecas realizadas con un fin concreto o por el uso continuo de la pieza.

La predicción para establecer cuando una pieza rompe debido a las imperfecciones y la búsqueda de soluciones al problema de la concentración de tensiones en una pieza sometida a tracción dinámica, han sido clave para el desarrollo de este proyecto.

Por estos motivos, se ha decidido realizar un estudio sobre las inestabilidades plásticas producidas en un material metálico.



Fig. 2.1 Ala del A-380

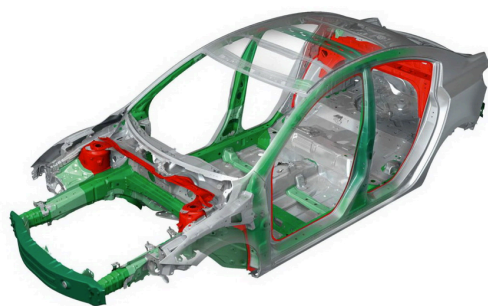


Fig. 2.2 Chasis del Mazda 3

3. METODOLOGÍA Y OBJETIVOS

Para realizar el proyecto, se ha decidido trabajar con el programa Abaqus/Explicit ya que es uno de los programas más potentes de cálculo de elementos finitos y ampliamente utilizado en los sectores aeronáuticos e industriales para el análisis dinámico, en el cual se ha sometido a las probetas a diversas simulaciones.

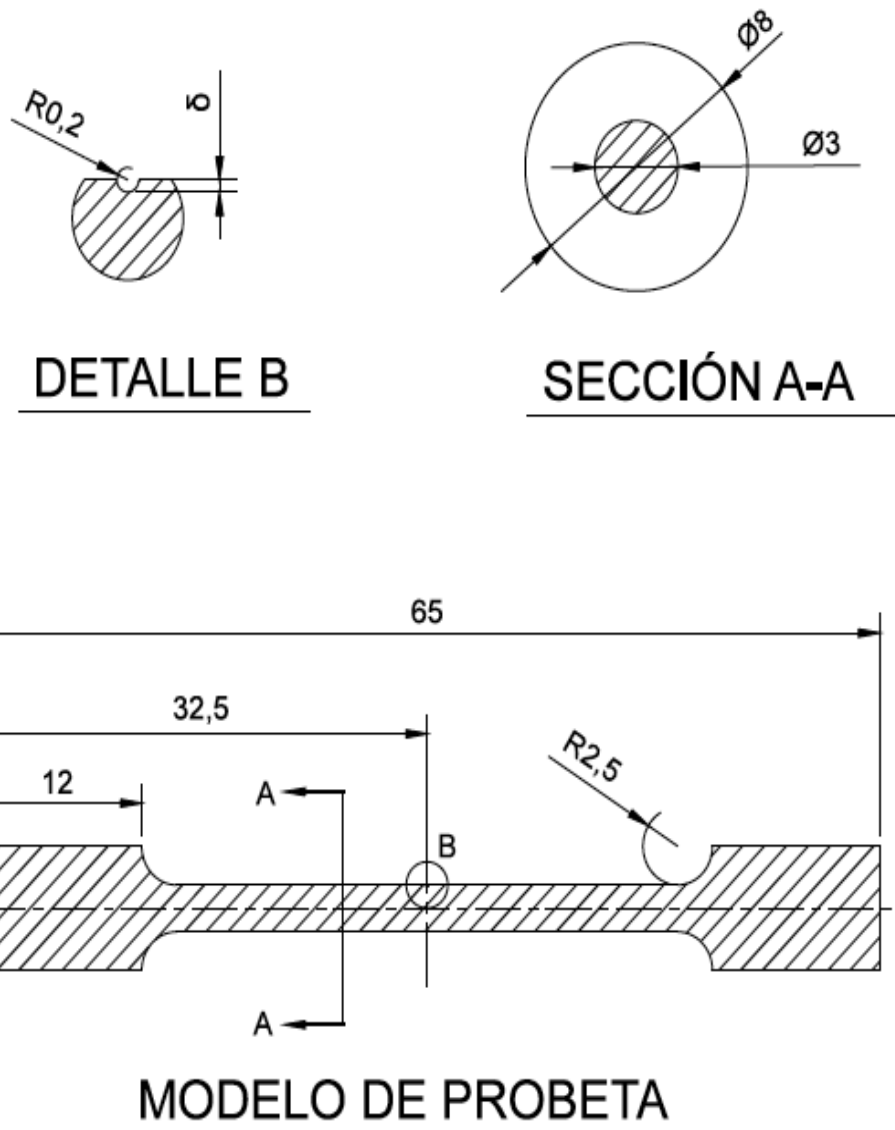


Fig. 3.1 Modelo de la probeta utilizada en el proyecto. Cotas en milímetros

Las dimensiones de la probeta serán las detalladas en la figura 3.1, modificando únicamente el tamaño de la entalla. El proyecto comenzará con una probeta sin entalla, y a continuación se realizará en ella una entalla, la cual irá aumentando progresivamente su tamaño. Este varía desde tener unas dimensiones del 1% hasta un 10% del radio de la probeta, con un incremento del tamaño de la entalla en cada simulación del 1%.

Siendo el radio de la probeta $R=1.5$ milímetros el valor máximo de entalla será de 0.15 milímetros y el menor de 0.015 milímetros, tal y como figura en la tabla 3.1.

La entalla de nuestra pieza siempre será de forma circular. (figura 3.1 detalle B.).

TAMAÑO DE LA ENTALLA	δ (mm)
Sin entalla	0
1%	0.015
2%	0.030
3%	0.045
4%	0.060
5%	0.075
6%	0.090
7%	0.105
8%	0.120
9%	0.135
10%	0.150

Tabla. 3.1 Tamaño de la entalla introducida frente al radio de la probeta

Para introducir los datos en el programa Abaqus/Explicit, tomaremos como buena la hipótesis de ser perfectamente axilsimétrica y no tener ningún defecto, por lo que podemos trabajar con una sección de espesor diferencial de la pieza y por simetría de revolución estudiar el comportamiento de la probeta completa. Con esta simplificación no modificamos los resultados pero conseguimos mayor velocidad en la simulación y menor espacio de almacenamiento, ya que el mallado a utilizar tendrá menos nodos.

El objetivo del proyecto será encontrar una condición de carga en la que las inestabilidades se formen fuera de la entalla. En condiciones cuasi-estáticas, parece difícil dar una respuesta positiva, si embargo, bajo unas cargas adecuadas de tracción dinámica, podemos demostrar que se pueden formar fuera de la entalla.

Podemos definir inestabilidad como la reducción en el diámetro de la probeta que ocurre cuando está sometida a esfuerzos de tracción.

En el artículo *“Dynamic necking of notched tensile bars: An experimental study”*, D. Rittel, Y. Rotbaum, J. A. Rodríguez-Martínez, D. Sory y R. Zaera. (2013), se realiza un estudio experimental para evaluar los efectos de un concentrador de tensiones sobre probetas de acero martensítico sometidas a tracción dinámica. Este artículo reveló que bajo unas determinadas cargas, las inestabilidades pueden llegar a producirse fuera de la entalla.

El estudio que se está realizando intenta demostrar numéricamente el artículo anterior, fortaleciendo la idea de que la rotura de una probeta con entalla se pueda realizar, bajo unas condiciones de carga dinámicas adecuadas, fuera del concentrador de tensiones, siendo en este caso la entalla.

4. MODELO NUMÉRICO

En este apartado se expondrán las propiedades del material utilizado y las propiedades necesarias para usar el programa de elementos finitos Abaqus/Explicit, con el fin de realizar simulaciones numéricas de cada una de las situaciones.

En el estudio se han tomado unas propiedades del material manteniéndolas constantes en la realización del proyecto. Estas son:

- Densidad: 7800 kg/m^3 .
- Módulo de Young: 200 GPa .
- Coeficiente de Poisson: 0.3 .
- Límite elástico: 500 MPa .

Con respecto al límite elástico se tomará como cierta la hipótesis de comportarse como un material elástico perfectamente plástico, para simplificar la configuración así como los resultados obtenidos en las simulaciones.

El mallado de la pieza se ha realizado con elementos de forma cuadrada. Existirán dos tipos de malla, variando su tamaño dependiendo de la zona de la probeta tal y como se muestra en la figura 4.1:

- La zona central de la probeta, que es un cilindro de 3 mm de diámetro tiene un mallado de forma cuadrada de 0.01 mm^2 , con una longitud de lado igual a $L = 0.1 \text{ mm}$.
- La zona exterior de la probeta, con un diámetro de 8 mm , tiene un mallado de forma cuadrada de 0.16 mm^2 con una longitud de lado igual a $L = 0.4 \text{ mm}$.

La razón de introducir dos tamaños diferentes de malla en la probeta se debe a que entre la parte central y la exterior de la probeta, existe una diferencia de diámetro, siendo significativamente menor en la central. Debido a este cambio de diámetro se producen mayores tensiones en esta última y por ello, en esta parte de la probeta, se coloca un tamaño menor de mallado ya que es donde se producirá la localización de las inestabilidades y la posterior rotura.

Este mallado menor ayuda a ser mas precisos a la hora de predecir la rotura de la probeta y que exista menor intervalo de tensiones y deformaciones entre los elementos de la malla.

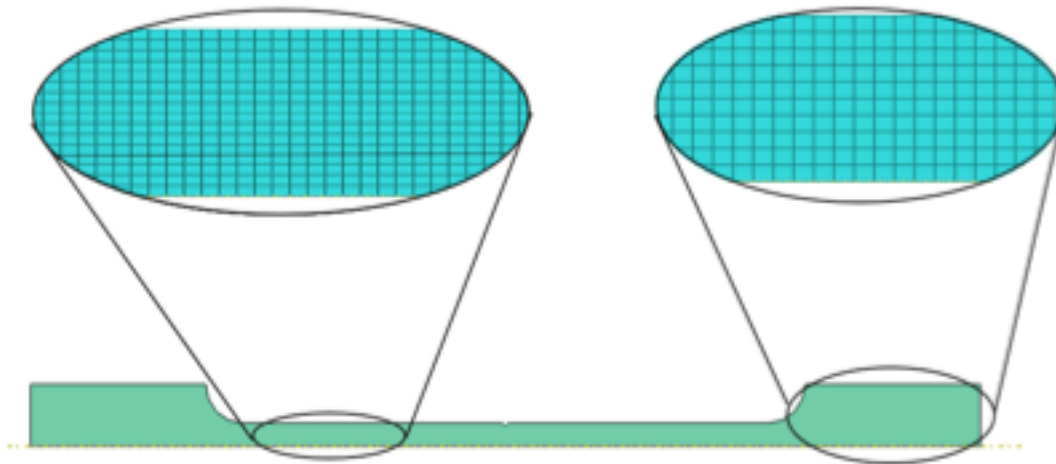


Fig. 4.1. Mallado de la probeta.

Para lograr unas condiciones dinámicas de tracción en la probeta, imponemos un empotramiento en un extremo de la probeta e introducimos una velocidad perpendicular al extremo empotrado. La velocidad de carga introducida en la probeta se irá modificando entre una velocidad mínima de 0.1 m/s hasta una velocidad máxima de 10 m/s.

La velocidad máxima que se ha utilizado en el estudio es 10 m/s, ya que con las propiedades y tamaño de la probeta esta velocidad ya es lo suficientemente alta como para que no varíe el punto de rotura respecto a velocidades superiores.

En el proyecto se pueden diferenciar dos partes. La diferencia existente es la forma de introducir la velocidad.

- Bajo condición de carga: introducir una velocidad de valor fijo en el extremo no empotrado de la probeta.
- Bajo condición inicial: Añadir una velocidad lineal a la probeta con una velocidad máxima en el extremo no empotrado de la probeta.

4.1 CONDICIÓN DE CARGA

La primera forma de introducir las tensiones en la probeta es bajo condición de carga, tanto en las probetas sin entalla como con entalla. Como se observa en la figura 4.2, esta forma consiste en introducir una velocidad de valor “ V_o ” en el extremo libre de la probeta. Esta velocidad se mantendrá fija durante la simulación, y se irá modificando entre 0.1 m/s y 10 m/s para diferentes simulaciones.

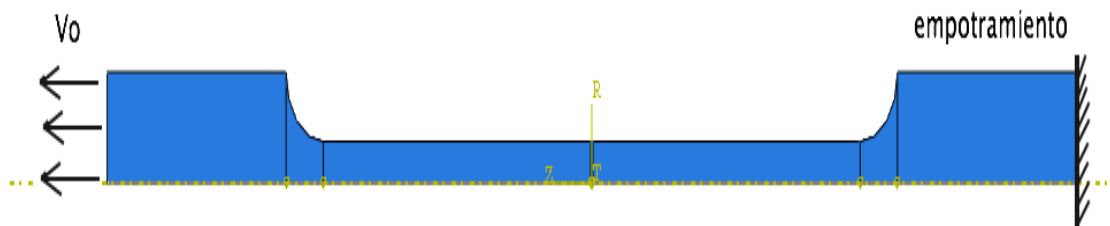


Fig. 4.2. Velocidad introducida en la probeta.

Al introducir una velocidad fija en el extremo libre de la probeta, se produce un cambio brusco de velocidad entre los puntos que se encuentran en ese extremo y los puntos que se encuentra inmediatamente a la derecha del él. La velocidad que tienen los puntos externos es la velocidad de carga introducida en la probeta “ V_o ”, mientras que la velocidad de los puntos mas cercanos a ese extremo será cero. Este cambio brusco de velocidad genera unas ondas internas en la probeta.

La propagación de ondas en la probeta se transmite desde el extremo libre hasta el extremo empotrado de la misma, al chocar la onda en el extremo empotrado ésta vuelve con las mismas características. Al encontrarse con la siguiente, se suman sus valores dando una onda de doble amplitud.

Las velocidad de propagación de las ondas en la probeta es constante siempre aunque modifiquemos las tensiones internas, ya que la ecuación de la velocidad de onda es:

$$C_e = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{donde:}$$

E: Modulo de Young

ρ : Densidad

Al tener las ondas una velocidad constante, el punto en el que se produzcan las inestabilidades será en función de la velocidad “Vo” y no de las ondas internas creadas, ya que la ecuación de la tensión es:

$$\sigma = \rho \cdot C_e \cdot V \quad \text{donde:}$$

ρ : Densidad

Ce: Velocidad de onda

V: Velocidad de carga.

Las ondas creadas producen que la rotura de la probeta se produzca en cualquier lugar de la misma, sin ser obligatoriamente una rotura simétrica.

Para que exista una simetría de las inestabilidades en la probeta debemos introducir una velocidad que aumente linealmente desde el empotramiento ($V = 0$) hasta el otro extremo de la probeta con “Vo”.

Para ello debemos introducir en la simulación una condición inicial a la probeta.

4.2 CONDICIÓN INICIAL

Debido a las ondas creadas al introducir una velocidad puntual, no existe simetría en la localización de las inestabilidades. Por ello, y para ver como actúa la probeta sin ondas, se ha decidido hacer un estudio con condiciones iniciales.

La condición inicial consiste en introducir una velocidad fija en el extremo libre de la probeta, al igual que bajo condición de carga (fig. 4.2), y dos campos de velocidad como se muestra en la figura 4.3 y 4.4.

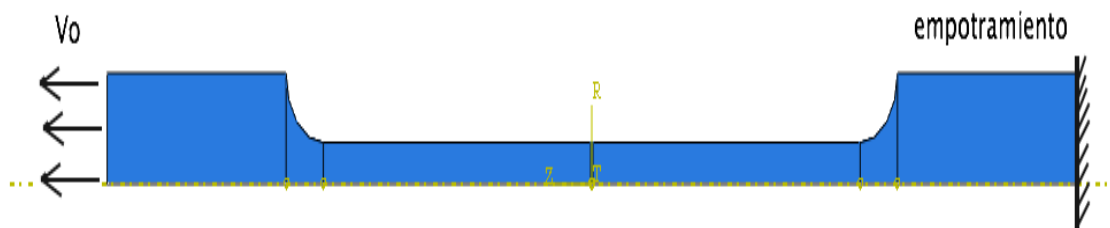


Fig. 4.3. Velocidad puntual bajo condición inicial.

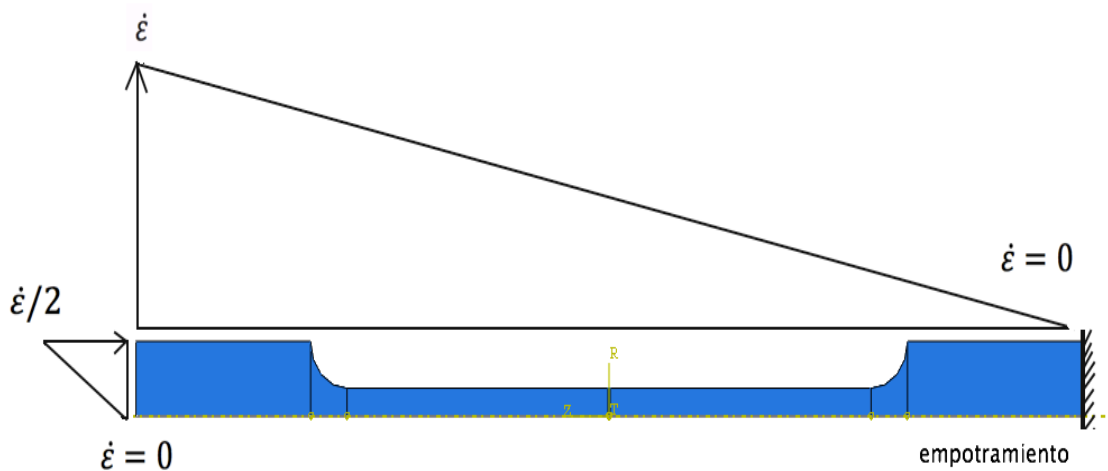


Fig. 4.4. Campos de velocidad bajo condición inicial.

La velocidad "Vo" expresada en la figura 4.2 se refiere a la velocidad externa introducida en nuestra probeta, a la queremos que se realice la simulación. Esta velocidad puede variar dependiendo de la simulación desde 0.1 m/s hasta 10 m/s.

Para que en nuestra pieza no existan ondas, además de introducir una velocidad fija en el extremo libre de la probeta, se debe añadir un campo de velocidad (figura 4.3) en la dirección longitudinal de la probeta. Este campo tendrá una velocidad $\dot{\epsilon} = 0$ en el extremo empotrado de la probeta y " $\dot{\epsilon}$ " en el extremo libre, siendo " $\dot{\epsilon}$ " igual a:

$$\dot{\epsilon} = V_0/l_0 \text{ donde:}$$

V_0 : velocidad puntual introducida en la probeta.

l_0 : longitud inicial de la probeta.

Debido a la conservación de volumen, se deberá de introducir un campo de velocidad transversal en la probeta (figura 4.4). La velocidad de este campo debe ser la mitad que la introducida en el longitudinal, por lo que, la velocidad introducida será de: " $\dot{\epsilon}/2$ "

Al conseguir introducir la condición inicial eliminamos las ondas de la probeta por lo que se conseguirá que la localización de las inestabilidad sea siempre simétrica.

5. RESULTADOS: EL PAPEL DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS EN LA LOCALIZACIÓN DE LAS INESTABILIDADES.

Este punto muestra los resultados de la localización de las inestabilidades en una probeta con una condición de carga en la que existen ondas que actúan en el interior del material. Para ello se mantiene todos los parámetros del modelo numérico a excepción de la velocidad de la condición de carga, que irá cambiando para ver su influencia en los resultados finales.

Para poder entender el concepto de propagación de ondas, se adjunta la figura 5.1 en la cual se aprecia la propagación de ondas a través de una probeta. De este modo se podrá visualizar cómo la onda va avanzando a través del material.

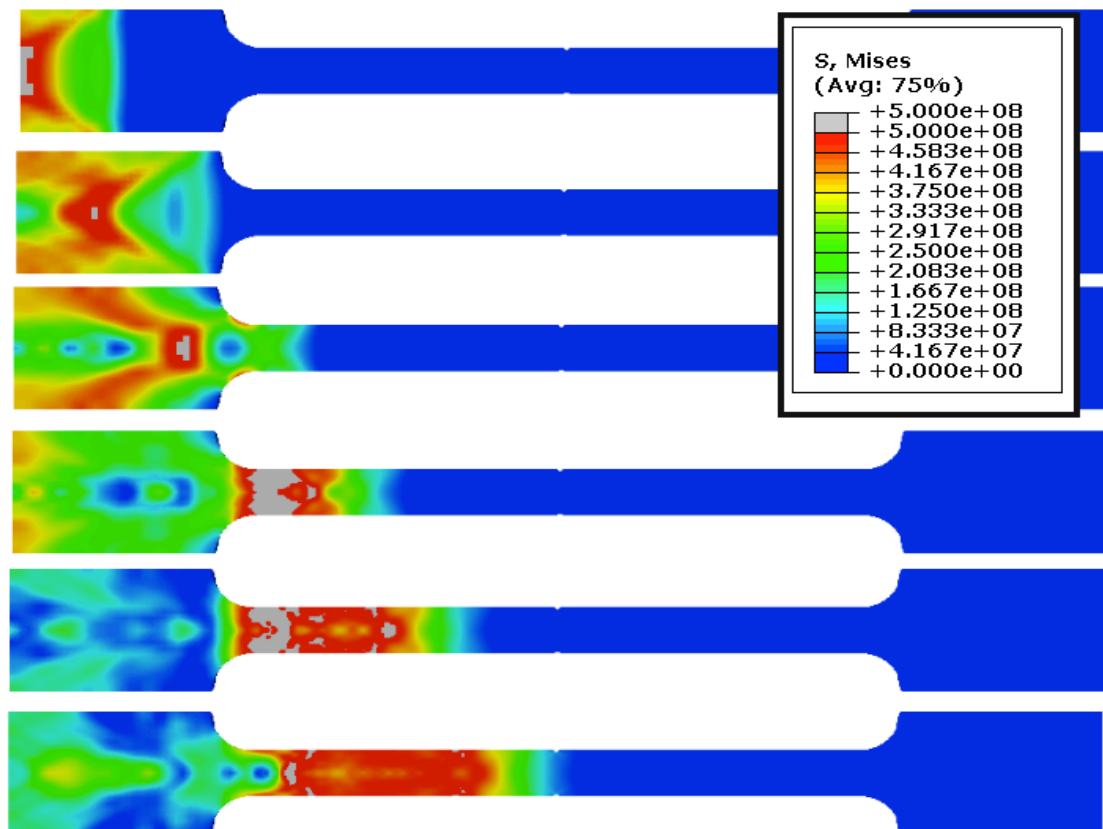


Fig. 5.1. Propagación de onda en una probeta

La figura 5.1 muestra como avanza la onda en pequeños intervalos de tiempo menores a un microsegundo. Además, en esta imagen se puede apreciar como la velocidad de onda es constante en el tiempo .

Una vez presentado todos los datos que se van a utilizar para la obtención de los resultados del proyecto, se procede al análisis de los mismos. El análisis de resultados se procederá de la siguiente forma.

- 1. Estudio de la propagación de ondas en la localización de inestabilidades en probetas sin entalla.

En el primer apartado se conocerá cómo se comporta una probeta cuando está sometida a esfuerzos, y se utilizará como ejemplo el primer estudio realizado para el proyecto que es el de la probeta sin entalla. Además se comparan los resultados obtenidos con las distintas velocidades a las que se ha sometido a la pieza, explicando las similitudes o diferencias que puedan existir con respecto a las demás velocidades.

- 2. Estudio de la propagación de ondas en la localización de inestabilidades en probetas con entalla.

En el segundo apartado se incluyen todas las probetas con entalla y se compararán entre si. Para ello se buscarán las diferencias entre ellas, deduciendo la velocidad a la que la probeta rompe por la entalla.

- 3. Observaciones.

En este apartado se comparan los resultados obtenidos entre probetas con entallas y probetas sin entalla. Se buscará las diferencias y similitudes entre las distintas probetas con mismas velocidades.

5.1 LOCALIZACIÓN DE INESTABILIDADES EN PROBETAS SIN ENTALLA

Para la localización de inestabilidades en probetas sin entalla se han realizado una serie de simulaciones con velocidades desde 0.1 m/s hasta 10 m/s.

El primer punto a destacar en estas simulaciones es la influencia de la velocidad en la localización de las inestabilidades. Para una probeta sin entalla, se encuentran dos posibles lugares para la localización de estas inestabilidades. Para que se pueda observar este fenómeno se muestran las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 que se refieren a la deformación existente en probetas con unas velocidades de 10 m/s, 8 m/s y 1 m/s respectivamente.

En las imágenes propuestas la zona empotrada de la probeta es la zona transversal de la misma que se encuentra en la zona superior derecha de la imagen. Esta consideración será igual para todos los ejemplos utilizados en el proyecto.

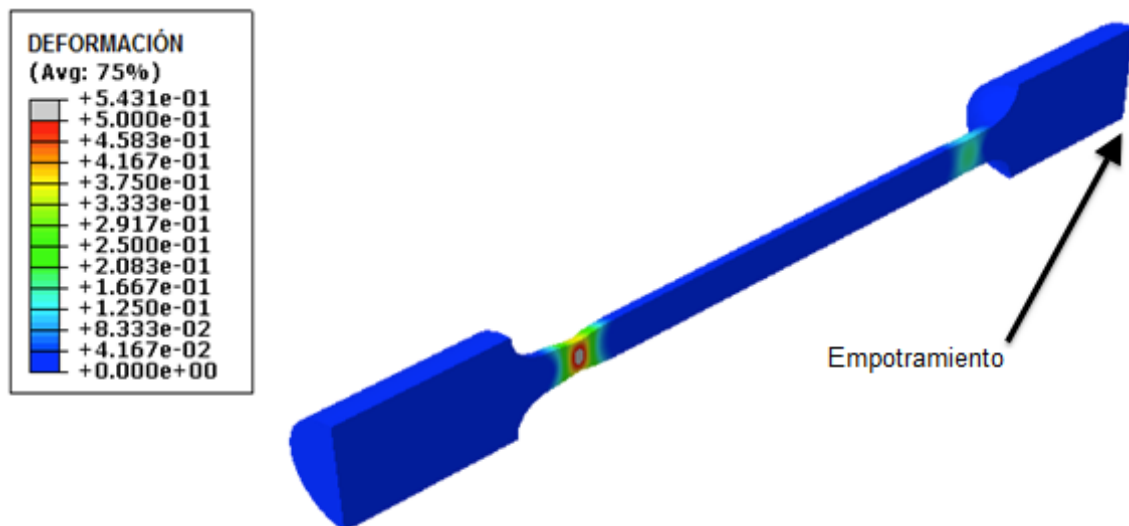


Fig. 5.2 deformación de una probeta sin entalla con velocidad 10 m/s

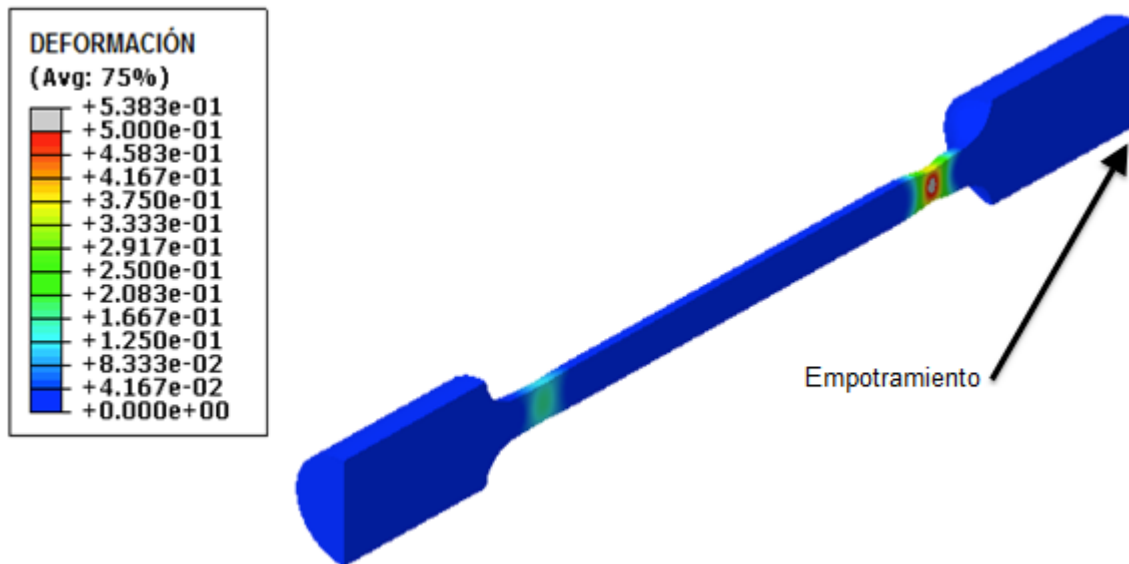


Fig. 5.3 Deformación de una probeta sin entalla con velocidad de 8 m/s

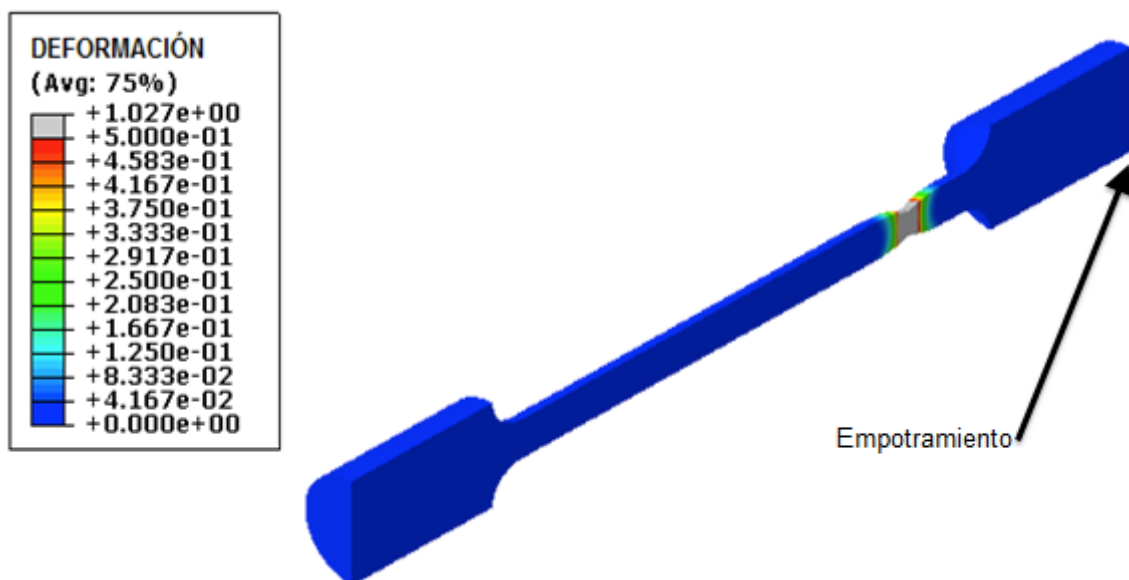


Fig. 5.4 Deformación de una probeta sin entalla con velocidad 1 m/s

En las imágenes se observa un cambio de lugar en la formación de las inestabilidades para la velocidad de 8 m/s. Para esta velocidad, aunque la rotura se producirá solamente en la zona más cercana al empotramiento, se aprecia como existe una inestabilidad en dos lugares diferentes, por lo que se puede expresar que aproximadamente a una velocidad de 8 m/s, el punto de rotura de la probeta cambiará de lugar.

Una vez localizada la velocidad a la que las inestabilidades cambian de lugar, se puede afirmar que, para velocidades superiores a 8 m/s la localización de la entalla se encuentra cercana al extremo libre de la probeta, mientras que para velocidades entre 8 m/s y 0.1 m/s, la localización de las inestabilidades se encuentra en la zona cercana al empotramiento.

Este cambio se debe exclusivamente a la velocidad de carga. Como se ha explicado con anterioridad, la tensión que se produce en la probeta es: $\sigma = \rho \cdot C_e \cdot V$, por lo que se observa que el único cambio que existe entre una y otra simulación es el referido a la velocidad de la misma.

Para velocidades superiores a 8 m/s la tensión producida en la probeta supera el límite de tensión del material, 500 MPa, por lo que la entalla se localiza inmediatamente después del punto donde se ha impuesto la velocidad.

Para velocidades entre 8 m/s y 0.1 m/s la tensión producida es inferior al límite de tensión, pero es superior a la mitad del límite de tensión. Debido a las propiedades de las ondas, al llegar la primera onda al punto empotrado, ésta vuelve de manera positiva, y al encontrarse con la siguiente onda, se suman. Al superar ambas ondas la mitad del límite de tensión y sumarse, se consigue superar el límite de tensión del material formando en el punto de encuentro inestabilidades, estando este punto en la zona cercana al empotramiento.

Para poder entender mejor este concepto se añade la figura 5.5.

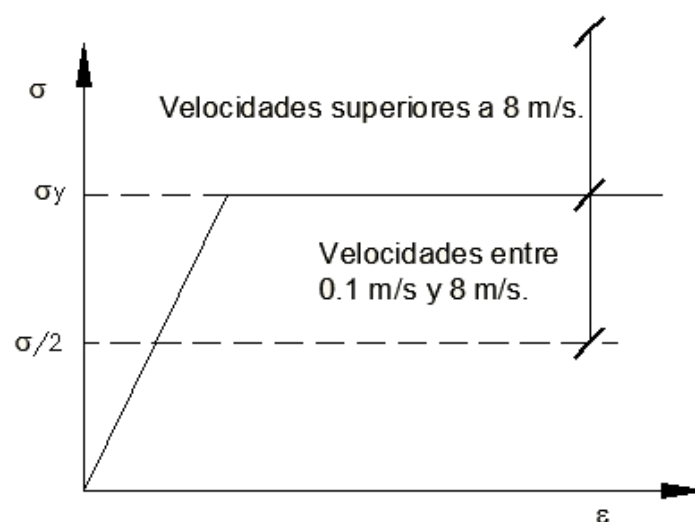


Fig. 5.5. Gráfica tensión deformación para probetas sin entalla.

Aunque no se encuentre entre las velocidades ejemplo del proyecto, existe una velocidad a partir de la cual no se supera el punto medio del límite del material. Para esta velocidad y las inferiores a esta, la inestabilidad se forma en el centro de la probeta. Esto se debe a que con una velocidad lo suficientemente baja, la simulación se comporta como si estuviese en un estado de simetría, por lo que se cumple la segunda ley de Newton y se puede deducir por la misma que la rotura de la probeta se producirá en el centro.

El segundo punto a destacar es la influencia de la velocidad en la tensión y en la deformación a lo largo de la probeta. Para este estudio se ha partido de una misma deformación en todas las simulaciones, siendo ésta de 1.5%. Con la deformación indicada se ha procedido a tomar las medidas de tensión y deformación a lo largo de la probeta.

Para este segundo apartado hemos tomado las mismas velocidades mostradas en el apartado anterior, 10 m/s, 8 m/s y 1 m/s.

En las figuras 5.6, 5.7 y 5.8 se muestra la tensión a lo largo de la probeta y para las figuras 5.9, 5.10 y 5.11 la deformación a lo largo de la probeta con las velocidades citadas anteriormente.

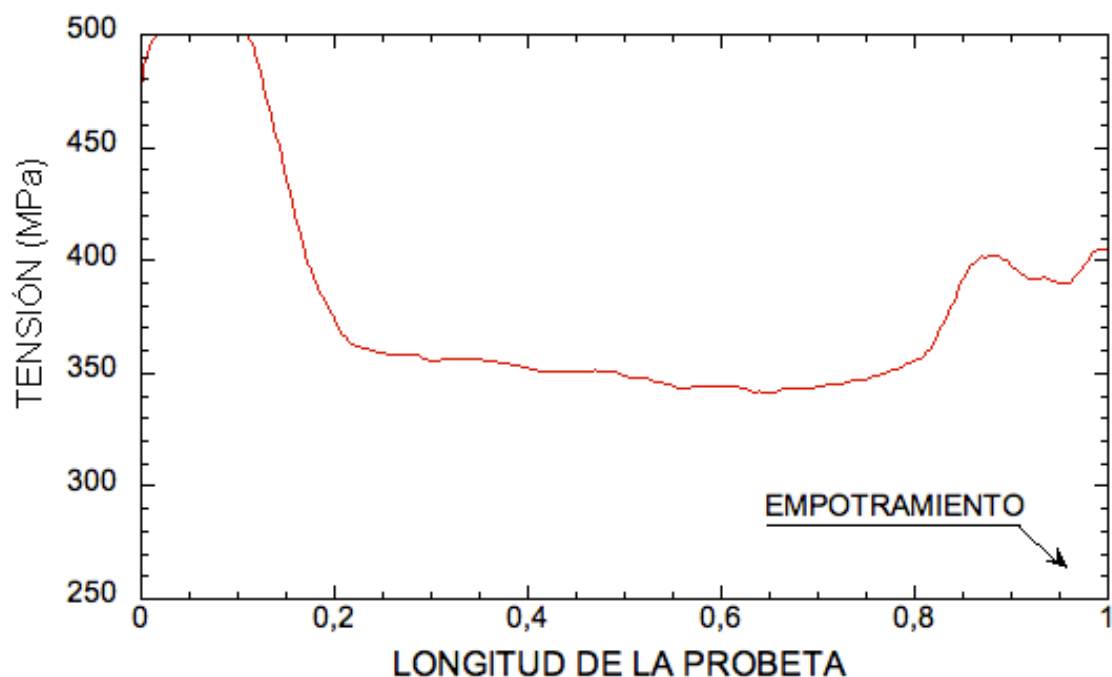


Fig. 5.6. Tensión a lo largo de una probeta sin entalla a velocidad de 10 m/s.

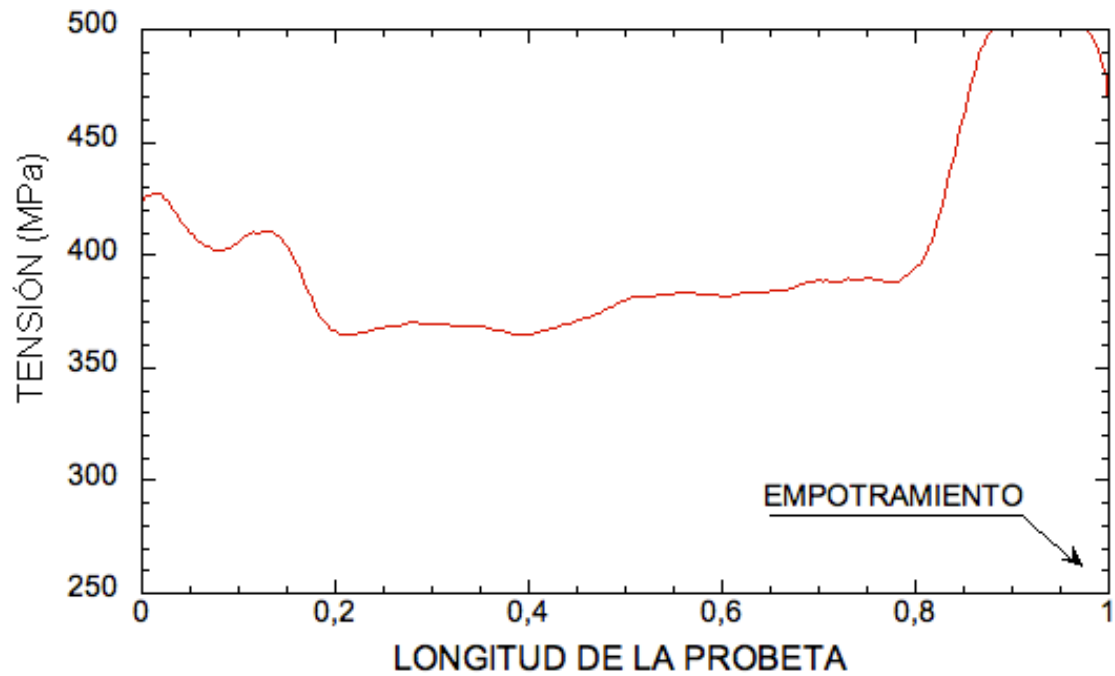


Fig. 5.7. Tensión a lo largo de una probeta sin entalla a velocidad de 8 m/s.

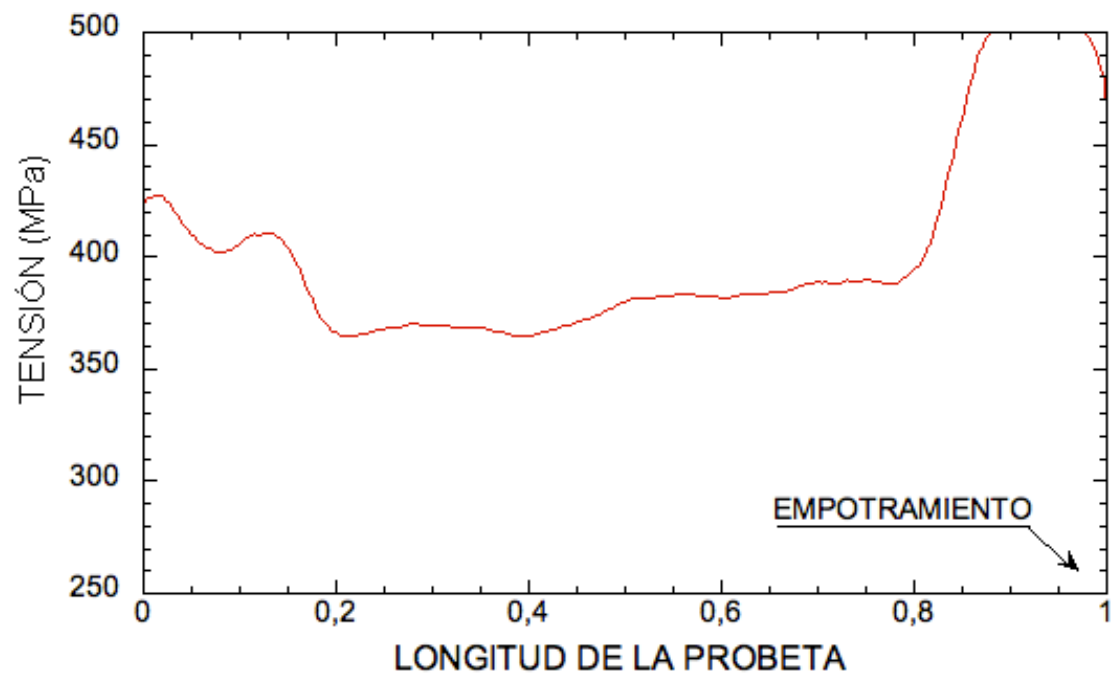


Fig. 5.8. Tensión a lo largo de una probeta sin entalla a velocidad de 1 m/s.

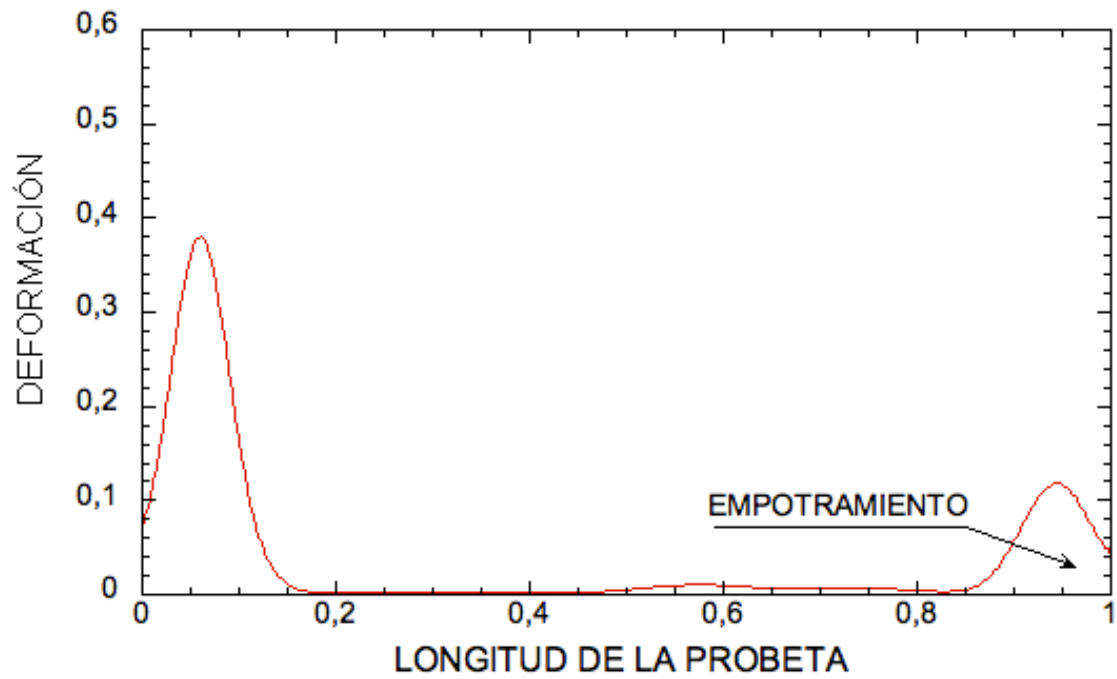


Fig. 5.9. Deformación a lo largo de una probeta sin entalla a velocidad de 10 m/s.

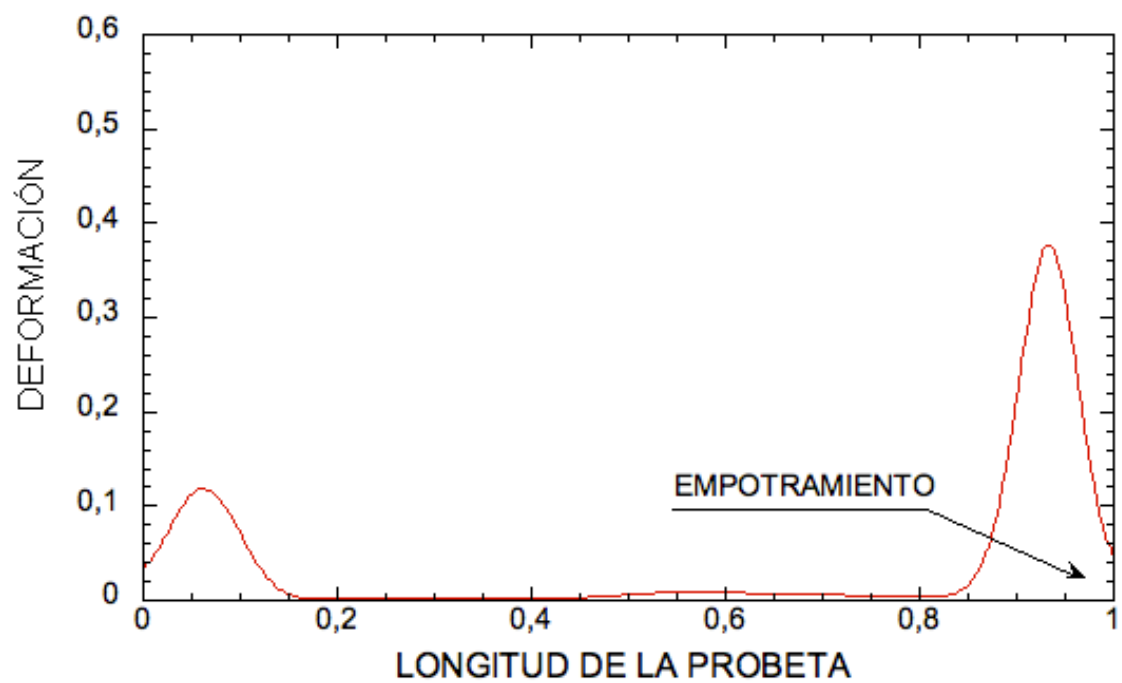


Fig. 5.10. Deformación a lo largo de una probeta sin entalla a velocidad de 8 m/s.

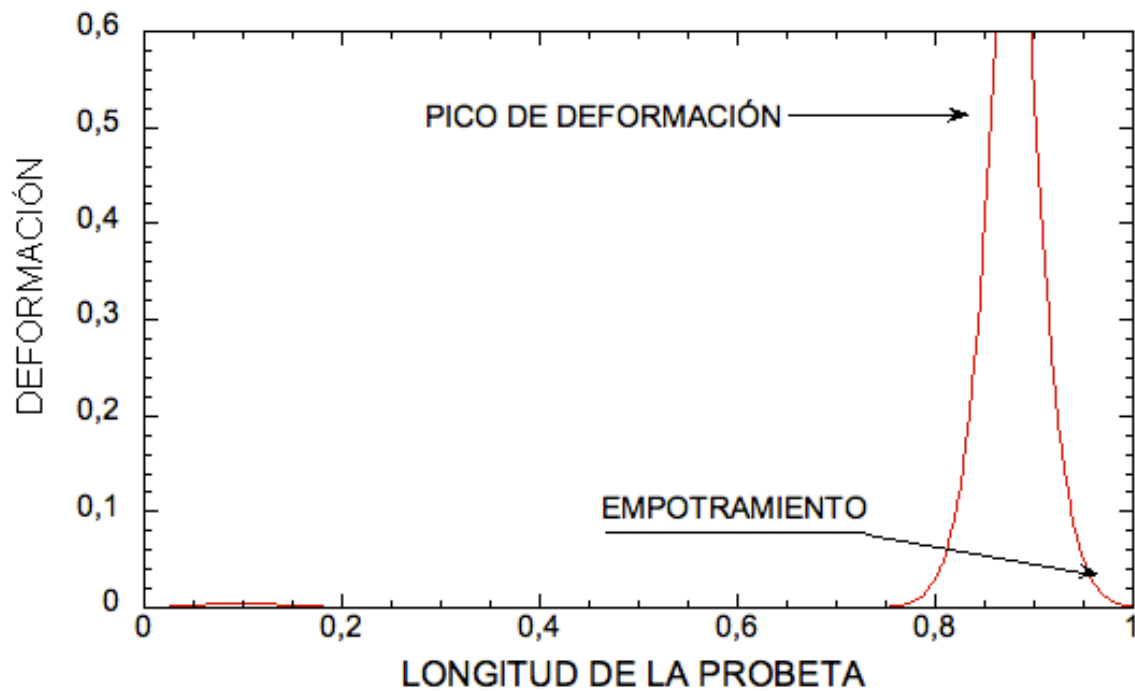


Fig. 5.11. deformación a lo largo de una probeta sin entalla a velocidad de 1 m/s.

Tanto en las gráficas de tensión como en las gráficas de deformación se puede observar dónde se encuentran los puntos inestables y las posibles zonas de rotura de la probeta, pues en esas zonas hay un gran aumento, con respecto a las demás zonas, tanto de la tensión como de la deformación de la probeta. Este fenómeno se observa mejor en la gráficas con velocidad de 1 m/s (fig. 5.8 y fig 5.9), ya que toda la deformación se concentra en un mismo punto de la probeta.

En las figuras 5.6, 5.7 y 5.8, se puede ver como al disminuir la velocidad, la localización de las inestabilidades se hace mas notoria, quedando en la gráfica, con velocidad 1 m/s, toda la probeta descargada de tensión, salvo el punto donde se encuentra la inestabilidad. También se observa, que bajo la velocidad de 8 m/s, la tensión que se produce en toda la probeta es muy alta, quedando incluso dos zonas de la misma por encima de 450 MPa, por lo que se deduce que existen dos zonas con inestabilidades plásticas, y además como se ha demostrado antes, para esta velocidad el punto de rotura cambia de lugar.

Al igual que en las figuras 5.6-5.8, en las figuras 5.9-5.11 también se aprecia una zona donde se localizan las inestabilidades plásticas y como esa zona cambia de lugar al disminuir la velocidad, pues vemos como a una velocidad de 10 m/s está en el extremo libre de la probeta, y al disminuir la velocidad hasta 1 m/s, cambia hasta el extremo empotrado de la probeta.

El tercer punto a destacar es la influencia de la velocidad en la curva de tensión deformación de la probeta. Para ello mostraremos seis curvas de tensión deformación referidas a las velocidades de 10m/s, 8m/s, 5m/s, 1m/s, 0.5m/s y 0.1 m/s. En las figuras 5.12-5.17 respectivamente.

Al observar las gráficas de tensión deformación, se puede apreciar como existen una serie de inestabilidades en las curvas de tensión deformación a altas velocidades. Estas inestabilidades se deben a que en la probeta no se cumple la segunda ley de Newton y el sumatorio de fuerzas en la misma es distinto de cero, ya que tenemos una velocidad en el extremo libre de la misma, mientras que en el otro extremo la probeta está empotrada.

Con velocidades cercanas a cero, estas inestabilidades desaparecen. Esto se debe a que aunque el equilibrio de fuerzas en la probeta todavía no existe, el sumatorio de fuerzas es cercano a cero, eliminando así las inestabilidades que en un principio se apreciaban en las gráficas, pudiendo tomar como válida la curva de tensión deformación para la velocidad de 0.1 m/s.

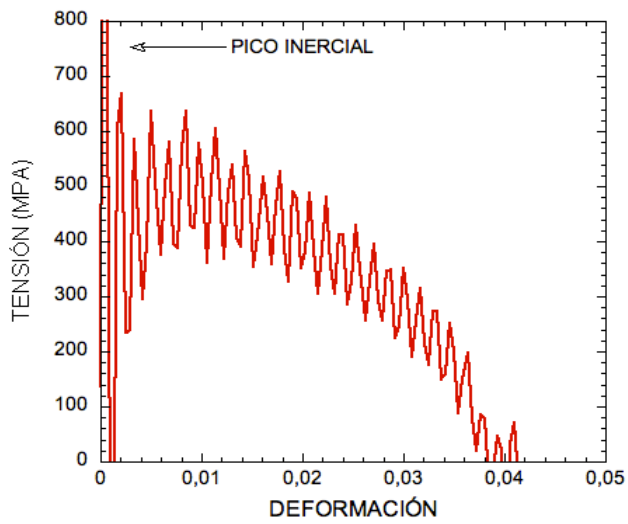


Fig. 5.12. Gráfica tensión-deformación a $V=10$ m/s.

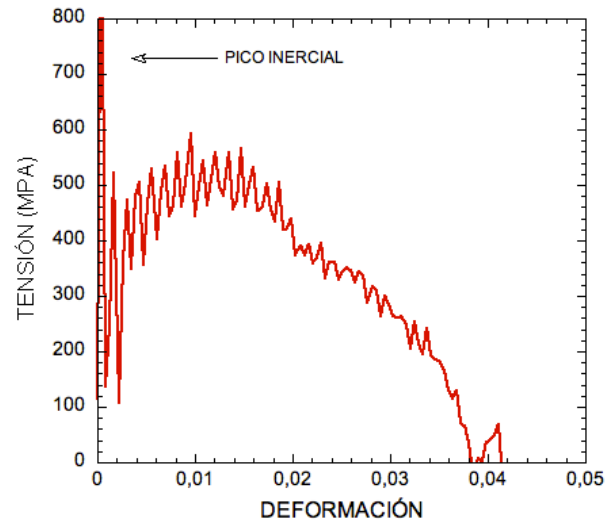


Fig. 5.13. Gráfica tensión-deformación a $V=8$ m/s.

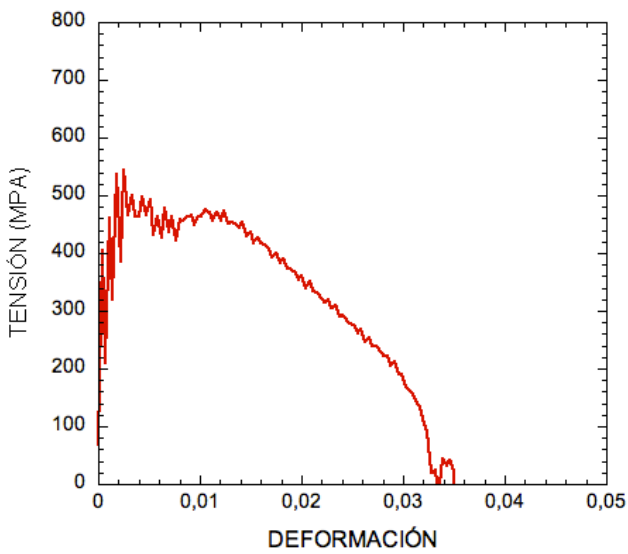


Fig. 5.14. Gráfica tensión-deformación a $V=5$ m/s.

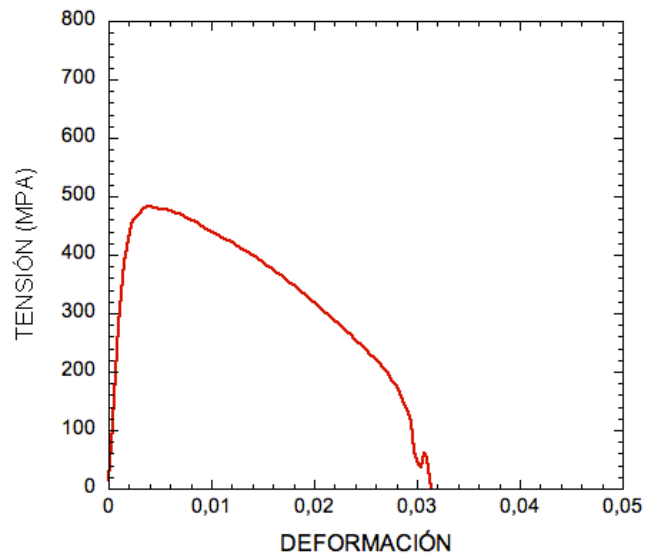


Fig. 5.15. Gráfica tensión-deformación a $V=1$ m/s.

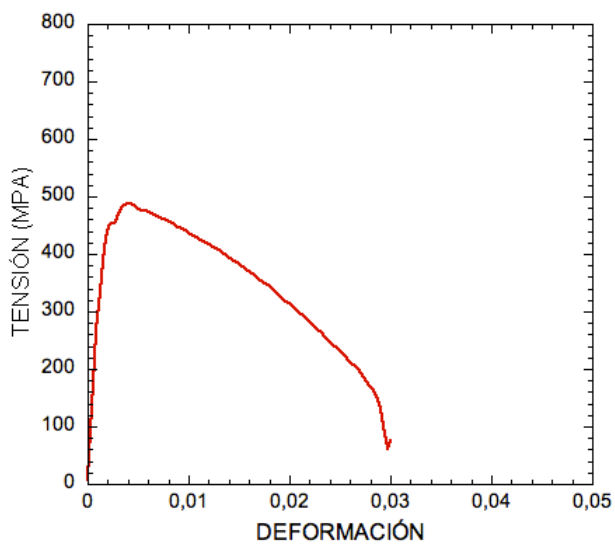


Fig. 5.16. Gráfica tensión-deformación a $V=0.5$ m/s.

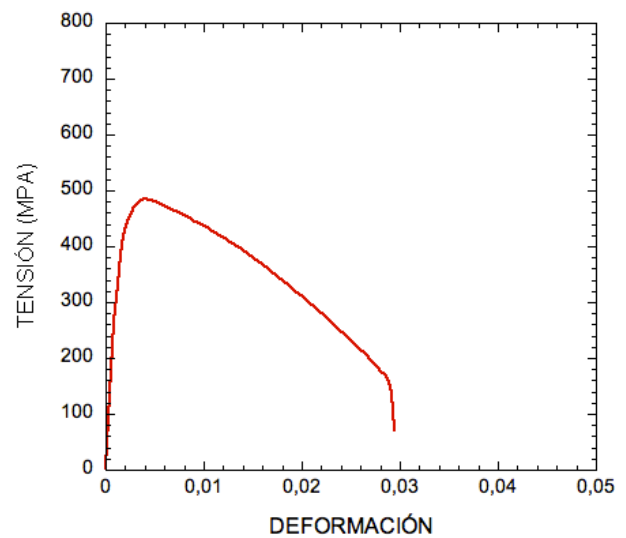


Fig. 5.17. Gráfica tensión-deformación a $V=0.1$ m/s.

5.2 LOCALIZACIÓN DE INESTABILIDADES EN PROBETAS CON ENTALLA

Para el estudio de probetas con entalla con condición de carga se han realizado simulaciones en probetas con entallas de tamaño desde 1% hasta el 10% del radio de éstas. Iniciaremos el estudio con las probetas con mayor tamaño de entalla para ir disminuyendo hasta llegar a probetas con entallas del 1%.

5.2.1 ROBETAS CON ENTALLA DEL 10%, 9% Y 8%

El estudio de las probetas con entallas desde el 8% al 10% se realizará en el mismo apartado. A estas tres probeta se las ha simulado para la velocidad máxima del proyecto de 10 m/s y el resultado es el mismo para las tres probetas, ya que las tres rompe por el mismo punto.

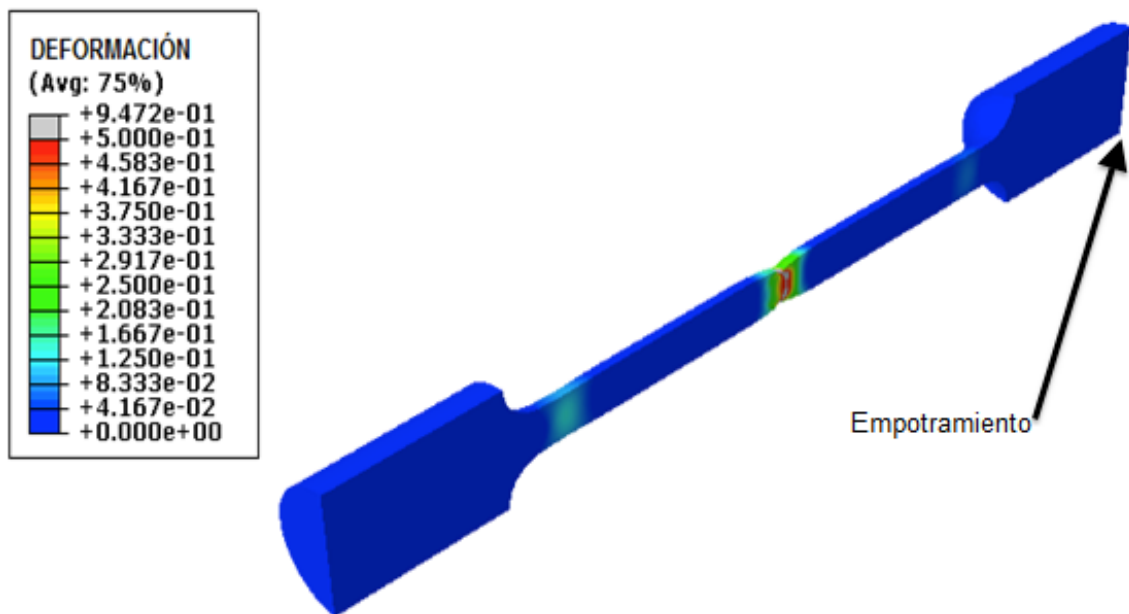


Fig. 5.18. deformación de una probeta con entalla del 8% a velocidad de 10 m/s.

Como se aprecia en la figura 5.18, la creación de la inestabilidad se ha iniciado en el centro de la probeta por lo que la entalla se ha convertido en un punto de concentración de tensiones tan alto que aún teniendo velocidades de hasta 10 m/s, la probeta rompe por la entalla, por lo que se puede asegurar que para velocidad inferiores a 10 m/s la probeta romperá en cualquier caso por la entalla siempre que esta sea superior al 8% del radio.

La influencia de la velocidad en la localización de las inestabilidades para velocidades entre 10 m/s y 1 m/s, es nula, ya que siempre rompe por la entalla.

En las figuras 5.19 y 5.20 se observan las gráficas de tensión y deformación a lo largo de una probeta, y al igual que para probetas sin entalla, se estudia para una deformación del 1.5%. En ellas se observa cómo la tensión y sobretodo la deformación se pronuncian en el centro de la probeta, donde se encuentra la entalla.

Esto se debe a que, aunque el punto donde se han encontrado las inestabilidades sea el punto central, hay una alta concentración de tensiones y deformaciones en la probeta. En la figura 5.20 se observa como aumenta la deformación cuando existe un cambio de sección en la probeta debido a la entalla.

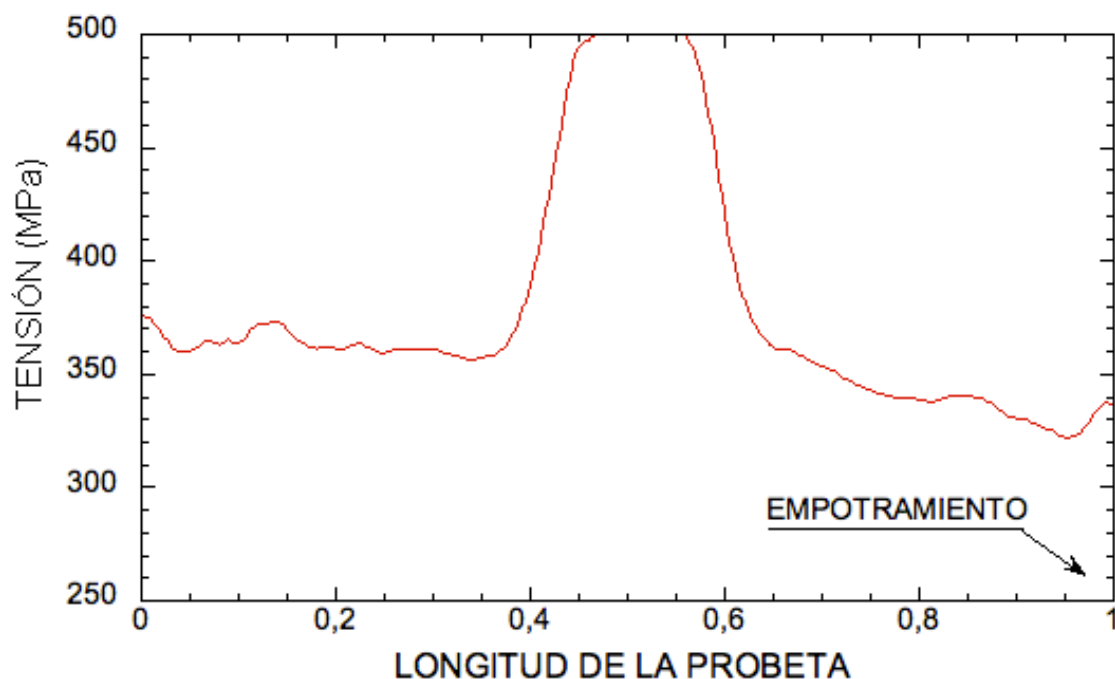


Fig. 5.19. Tensión a lo largo de una probeta con entalla del 8% para una velocidad de 10 m/s.

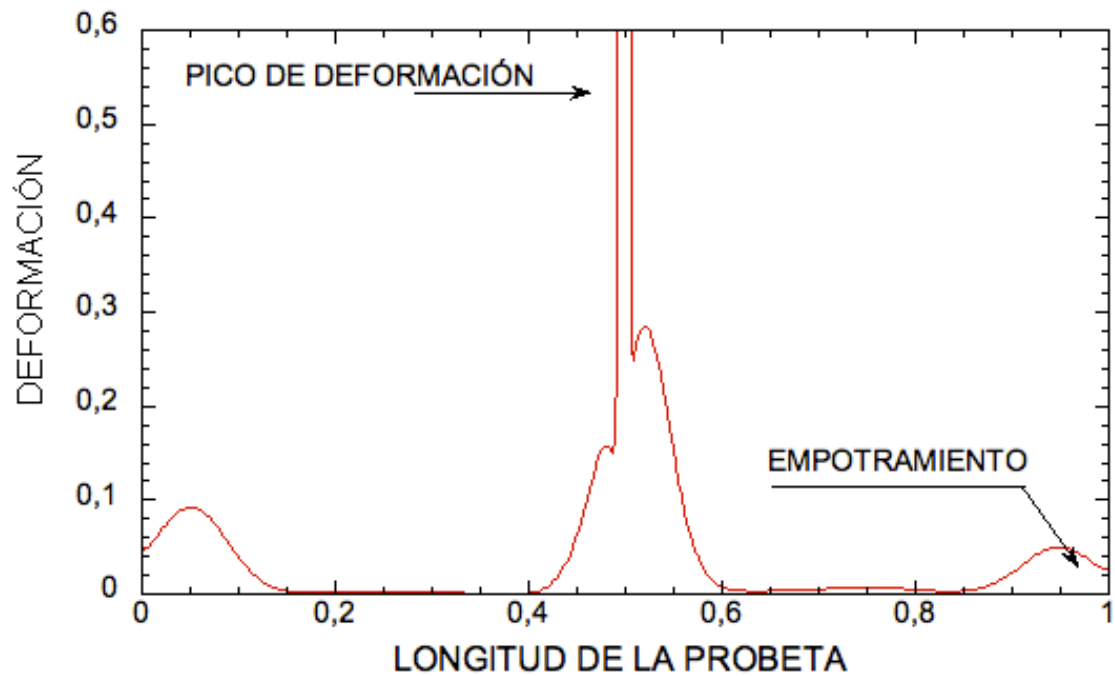


Fig. 5.20. Deformación a lo largo de una probeta con entalla del 8% para una velocidad de 10 m/s.

Como se observa en la figura 5.21, las gráficas de tensión-deformación para estas probetas tendrán las mismas inestabilidades que las gráficas de tensión-deformación que la probeta sin entalla, ya que este fenómeno se debe a que no existe equilibrio de fuerzas en la probeta.

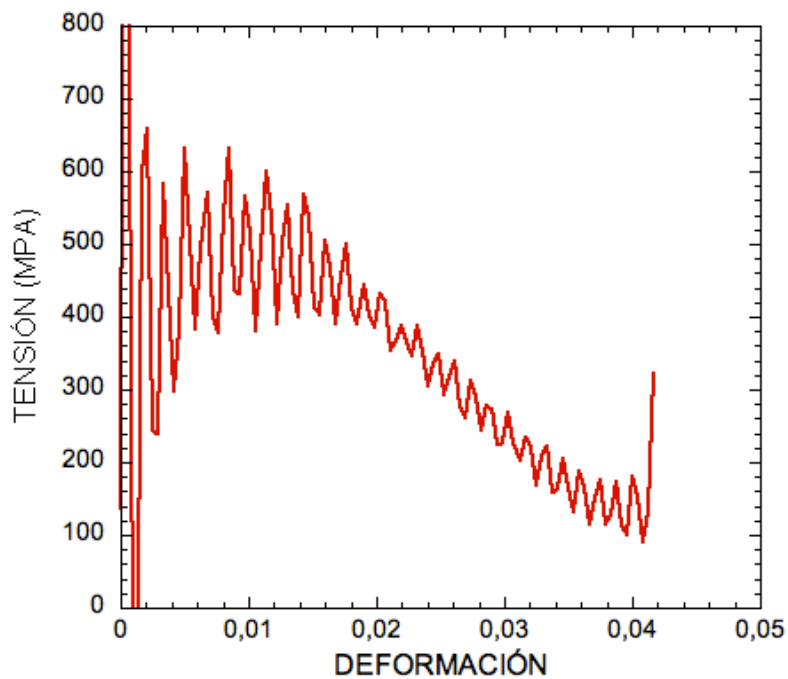


Fig. 5.21. Gráfica tensión-deformación para una probeta con entalla del 8% a $V=10\text{m/s}$

5.2.2 PROBETA CON ENTALLA DESDE EL 7% HASTA EL 1%

En las probetas con entallas entre el 7% y el 1% encontramos una gran diferencia con respecto a las anteriores, pues la influencia de la velocidad con respecto a la localización de la entalla es alta, ya que ahora, dependiendo de la velocidad de carga, la probeta romperá por lugares diferentes y no por la entalla, como podría suponerse. Esto se debe a que la acción de la entalla como concentrador de tensiones no es tan alta como en las probetas con entallas del 8% al 10%.

Para la probeta con entalla del 7%, la rotura de la pieza no se realiza por la entalla a una velocidad de 10 m/s, sin embargo, al reducir la velocidad de la simulación lo suficiente, ésta sí romperá por la entalla.

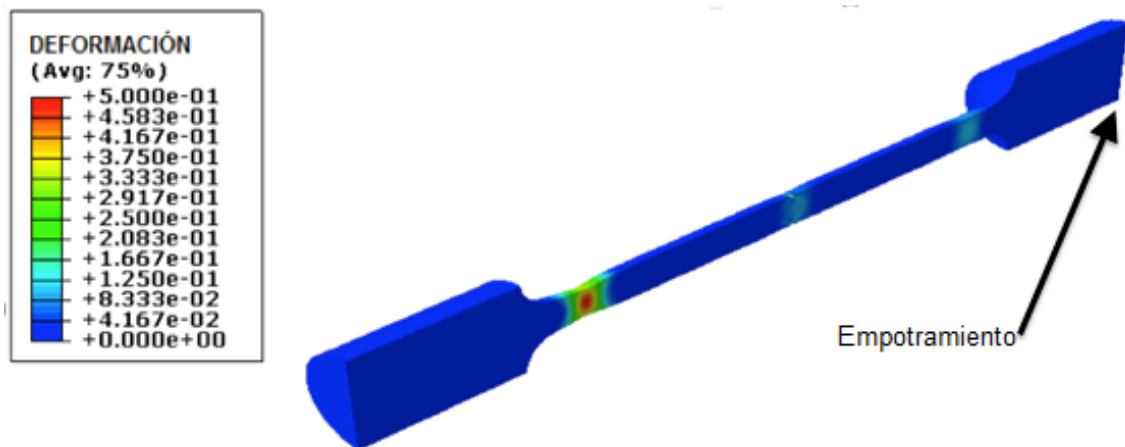


Fig. 5.22. Deformación de una probeta con entalla del 7% a una velocidad de 10 m/s.

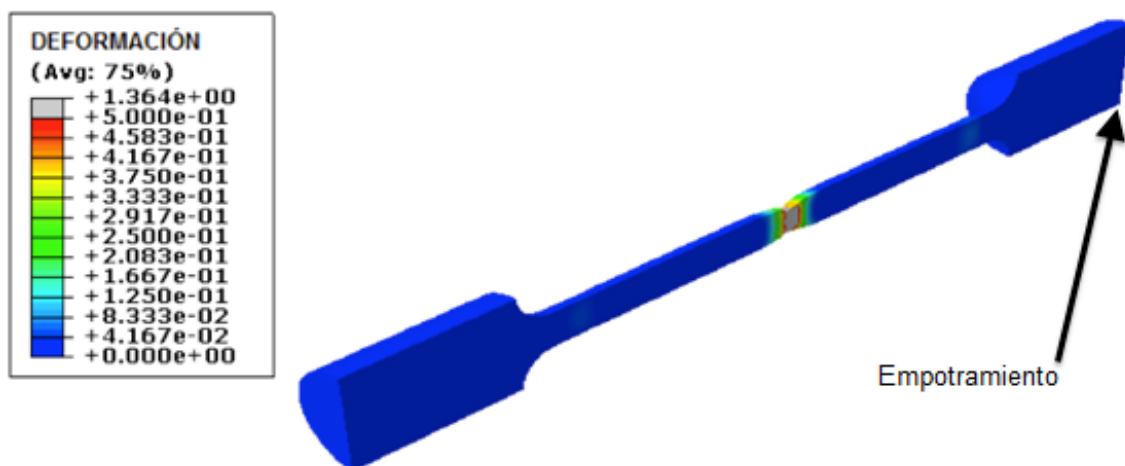


Fig. 5.23. Deformación de una probeta con entalla del 7% a una velocidad de 8 m/s.

En las figuras 5.22 y 5.23 se observa que a partir de una velocidad superior a 8 m/s la formación de las inestabilidades se produce fuera de la entalla, por lo que se demuestra que la entalla no determina el lugar de rotura de la probeta.

En las figuras 5.24 y 5.25 se observa el efecto de la entalla en la tensión y en la deformación a lo largo de la probeta, con un aumento repentino de la deformación y una disminución de la tensión.

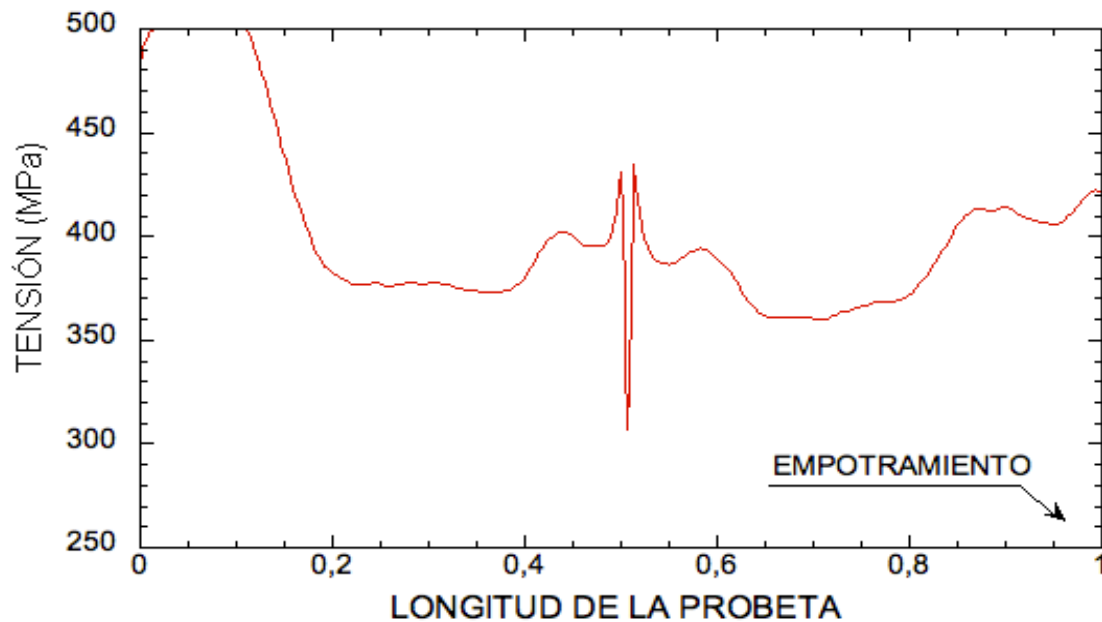


Fig. 5.24. Tensión a lo largo de una probeta con entalla del 7% para una $V=10$ m/s.

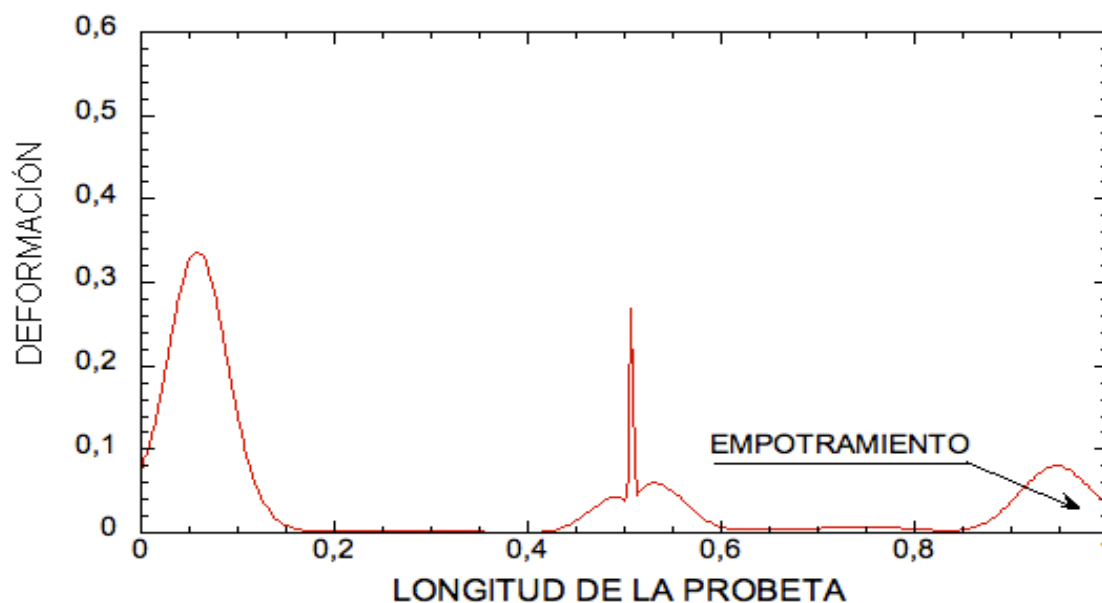


Fig. 5.25. Deformación a lo largo de una probeta con entalla del 7% para una $V=10$ m/s.

Para una velocidad de 10 m/s se propicia una deformación muy alta en la entalla, aunque como se observa en la gráfica 5.24 la tensión ha disminuido drásticamente ya que para tensiones de 300 MPa, lejos del límite de tensión, se crea una deformación del orden de 20% del total en la pieza, que aun no rompiendo por la entalla es una deformación alta.

A velocidad de 8 m/s, cuando la probeta con una entalla del 7% rompe por el centro, las gráficas de tensión y deformación a lo largo de la probeta, (fig. 5.24 y 5.25), son muy parecidas a las curvas obtenidas para probetas del 8, 9 y 10%.

A medida que disminuimos el tamaño de la entalla, la velocidad a la que la probeta rompe por ésta será también menor. Esto se debe a que cada vez que reducimos el tamaño de la entalla, la actuación de ésta como concentrador de tensiones no es tan alta, por lo que no afecta tanto a la probeta, teniendo que reducir la velocidad para que rompa por la entalla.

En la probeta sin entalla, existía una velocidad a la cual se producía un cambio en el lugar de formación de las inestabilidades, siendo ésta de 8 m/s. Para las probetas con entalla, este fenómeno ocurre a la misma velocidad.

Se debe destacar la probeta con entalla del 6%, pues es el mayor tamaño de entalla con el que la probeta rompe por tres lugares diferentes.

Como para probetas con entalla menores del 6%, la velocidad a la que la rotura de la probeta se realiza por la entalla es inferior a 8 m/s, se puede encontrar la formación de las inestabilidades en tres lugares distintos: en la zona cercana al empotramiento, en la zona cercana al extremo libre de la probeta, y en el centro de la probeta donde se encuentra la entalla.

En las figuras 5.26-5.28 se observa como la formación de la inestabilidad cambia de lugar para finalmente establecerse en el centro de la probeta a la velocidad de 3.75 m/s, donde se encuentra la entalla. En la comparación de la probeta con entalla del 7% frente a la del 6% se observa un cambio significativo en la velocidad a la que la probeta rompe por la entalla, ya que esta ha bajado de 8 m/s hasta 3.75 m/s.

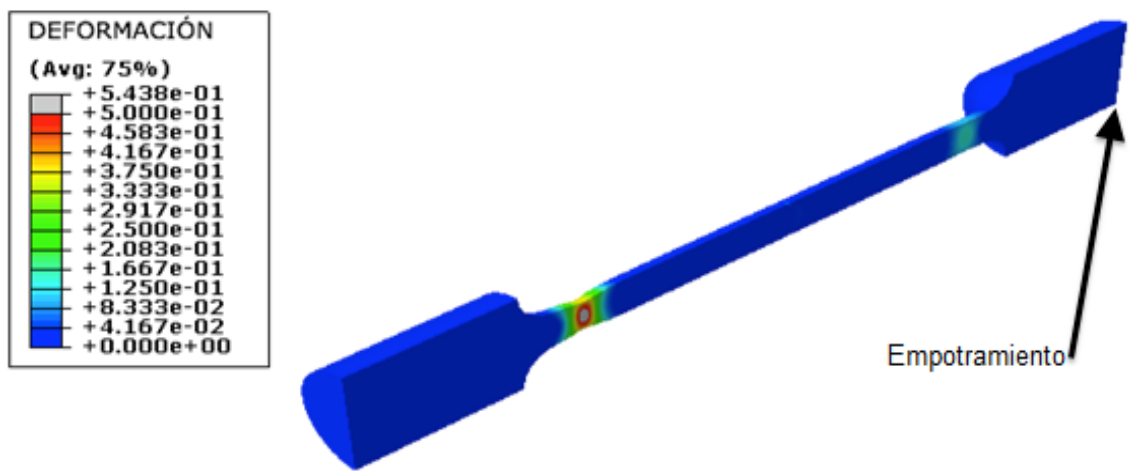


Fig. 5.26. Deformación de una probeta con entalla del 6% a una velocidad de 10 m/s.

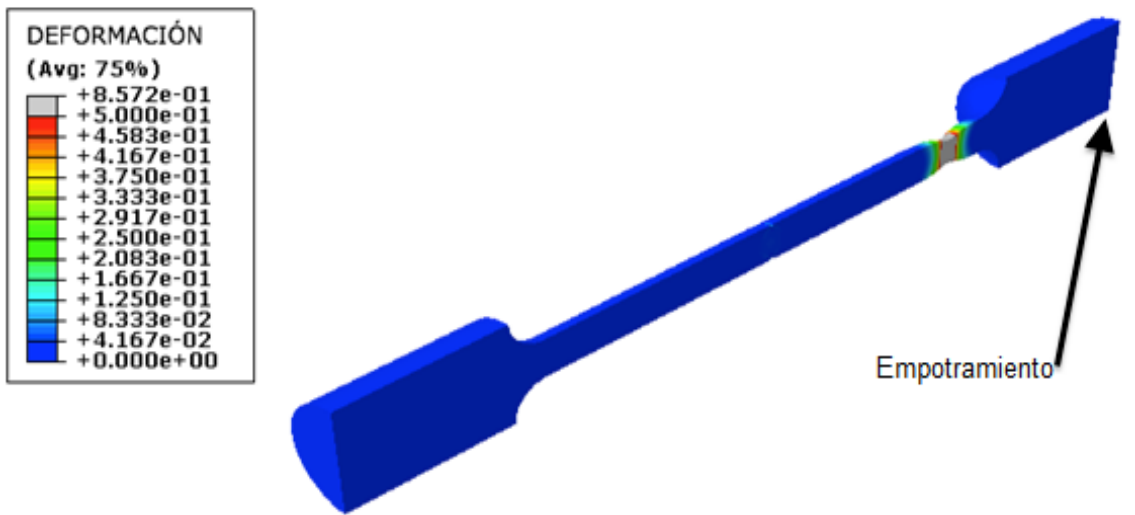


Fig. 5.27. Deformación de una probeta con entalla del 6% a una velocidad de 4 m/s

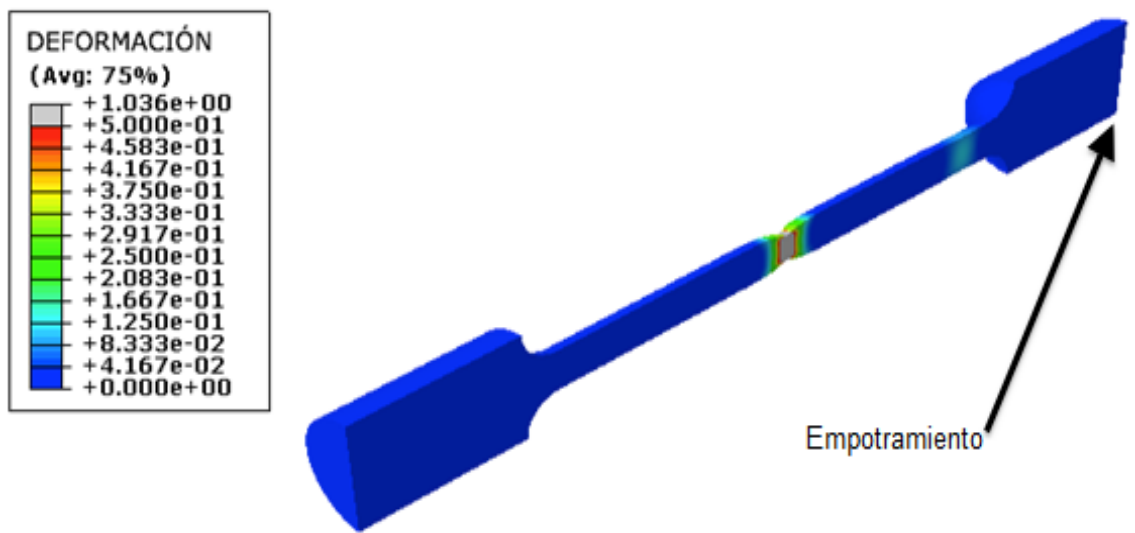


Fig. 5.28. Deformación de una probeta con entalla del 6% a una velocidad de 3.75 m/s.

La influencia de la velocidad en las gráficas de la tensión y la deformación a lo largo de una probeta con entalla, es muy alta, debido a la existencia de un concentrador de tensiones.

En las figuras 5.28-5.31 se muestran las gráficas de la tensión y de la deformación para unas velocidades de 4 m/s y 3.75 m/s.

El cambio de velocidad que se presenta, muestra un cambio brusco tanto en la tensión como en la deformación, ya que en ambas cambia el punto donde residen las mayores tensiones y mayores deformaciones. En el caso de la tensión se observa como en la entalla, pasa a tener una tensión de 250 MPa a tener una tensión de 500 MPa, sin embargo en el extremo de la probeta pasa lo contrario.

Para el caso de la tensión (fig. 5.29 y 5.30), es todavía mas llamativo pues la entalla a una velocidad de 4 m/s apenas se deforma y sin embargo para una velocidad 3.75 m/s se produce una deformación muy alta.

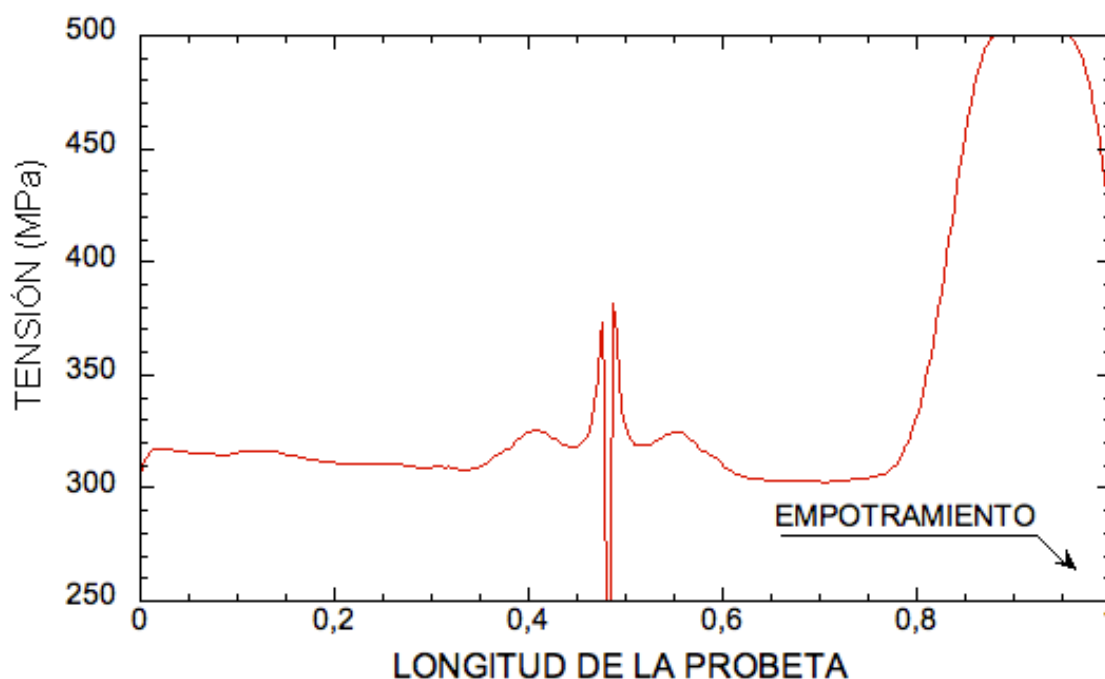


Fig. 5.29. Tensión a lo largo de una probeta con entalla del 6% para una velocidad de 4 m/s.

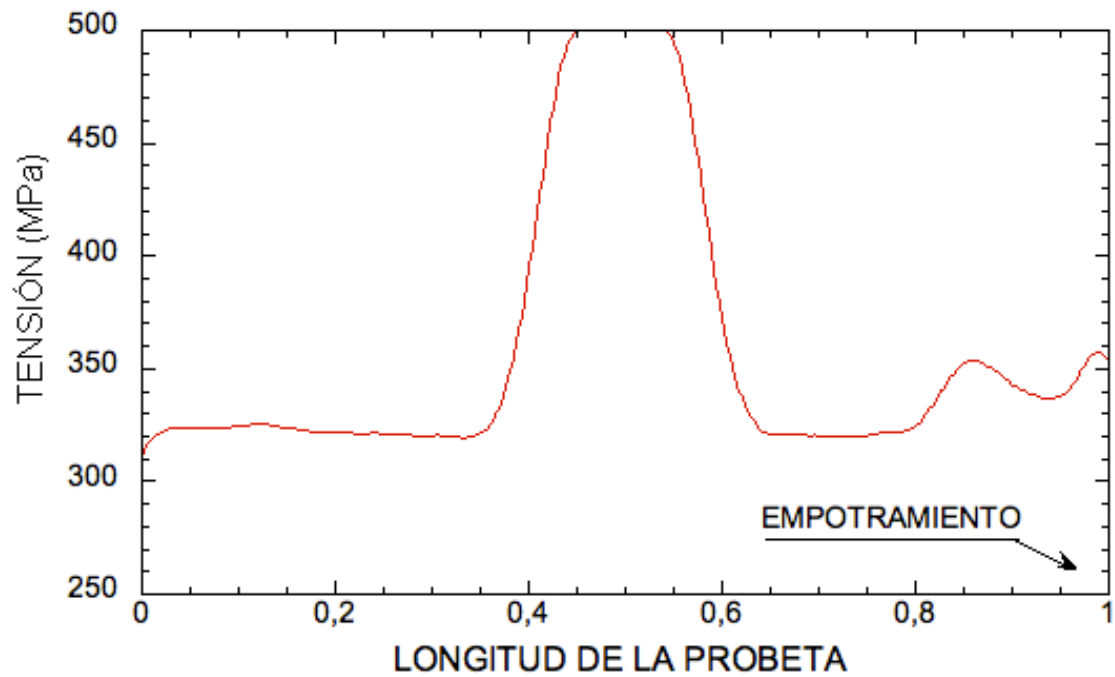


Fig. 5.30. Tensión a lo largo de una probeta con entalla del 6% para una velocidad de 3.75 m/s.

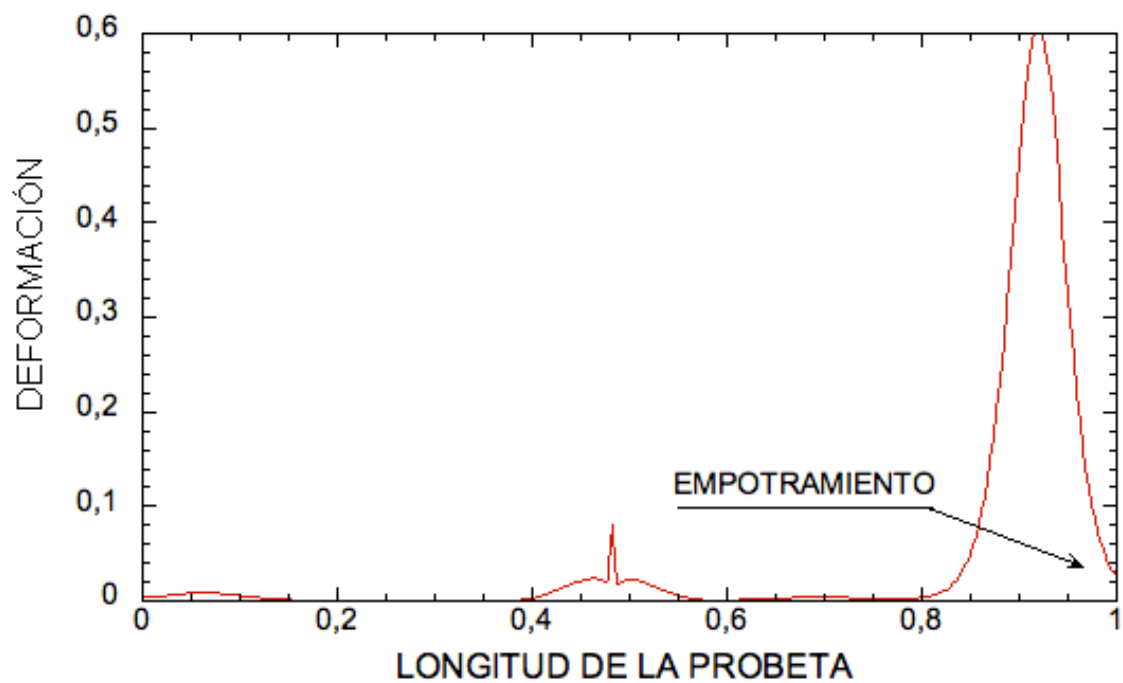


Fig. 5.31. Deformación a lo largo de una probeta con entalla del 6% para una velocidad de 4 m/s.

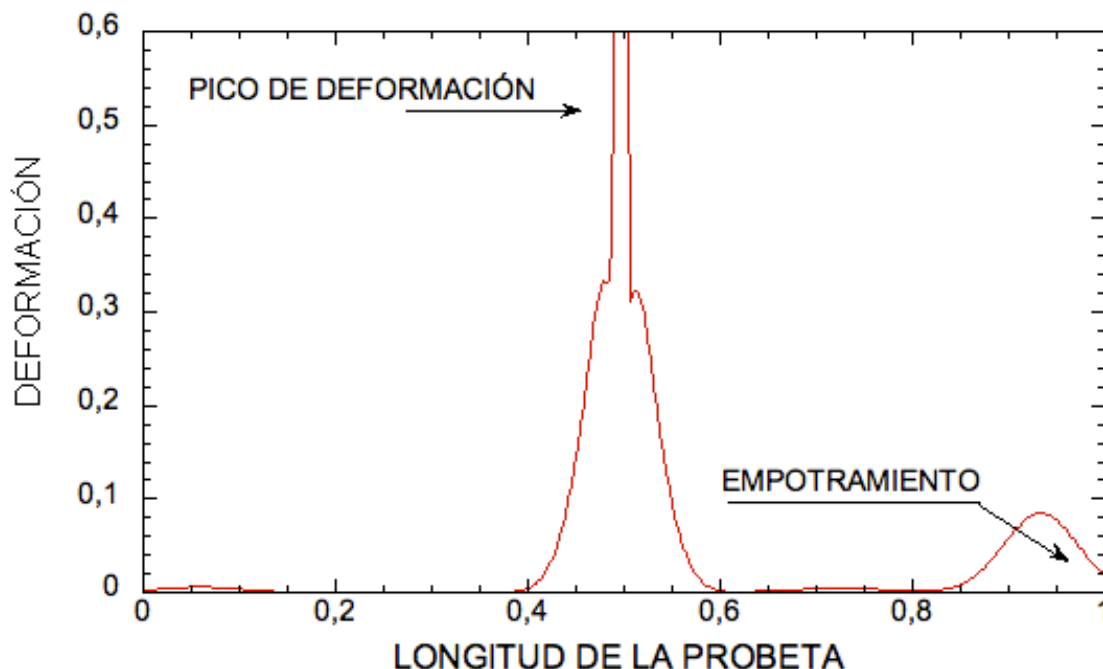


Fig. 5.32. Deformación a lo largo de una probeta con entalla del 6% para una velocidad de 3.75 m/s.

Para finalizar el estudio de probetas con entallas bajo condición de carga, se estudiará la probeta con entalla del 1%.

La figura 5.32 muestra la influencia de la velocidad en la formación de inestabilidades para las probetas con entalla del 1%, mostrando la deformación de la probeta para las velocidades 10 m/s, 8 m/s, 5m/s, 1m/s, 0.25 m/s y 0.1 m/s.

En la figura 5.33 se puede apreciar como la deformación parte desde un extremo, para llegar al centro de la probeta, donde tenemos la entalla, pasando por el otro extremo. Al igual que en las probetas con entallas desde el 2% hasta el 6% y en las probetas sin entalla la rotura de la misma se puede formar en tres lugares distintos, por lo que la influencia de la velocidad en la formación de las inestabilidades es alta.

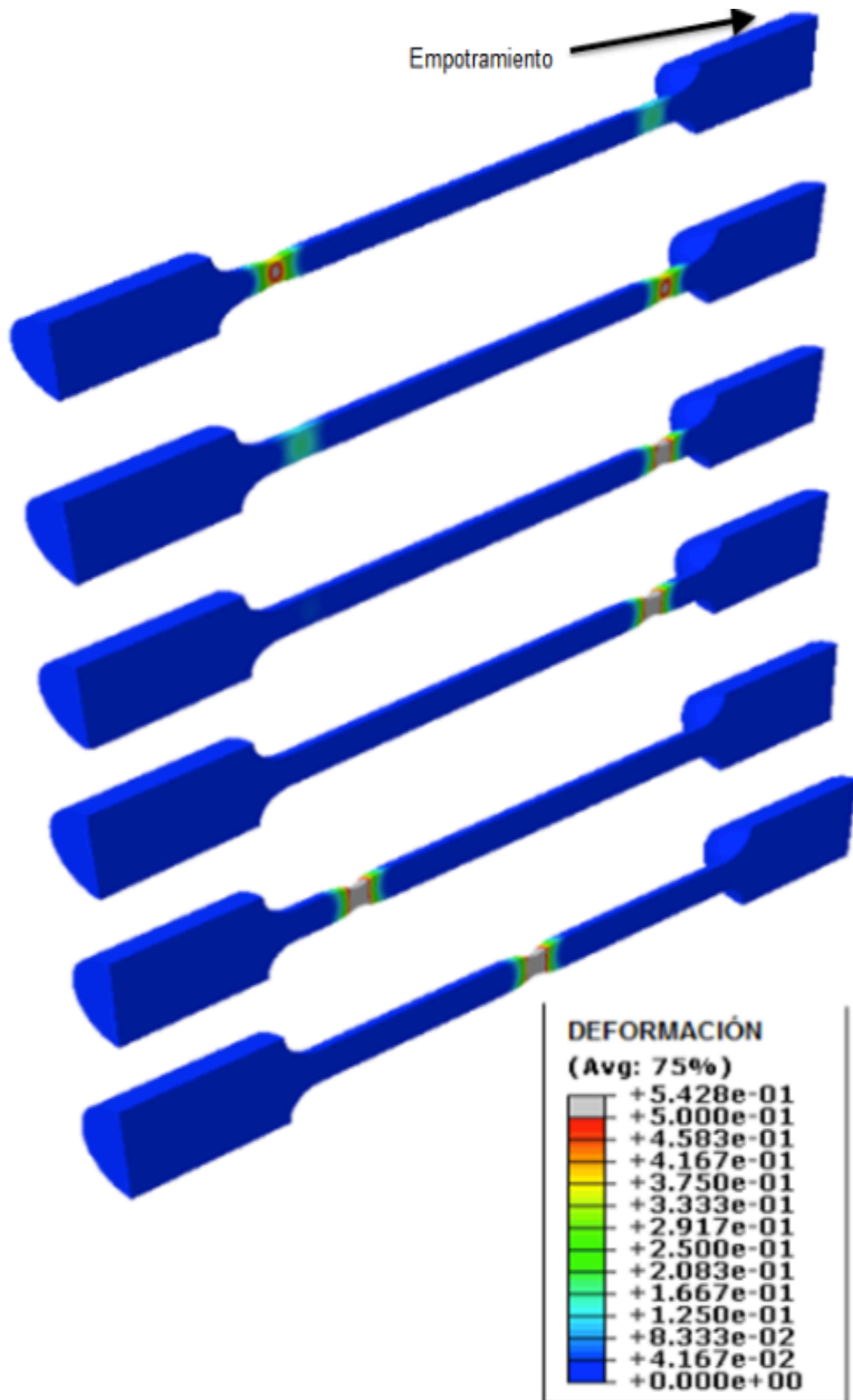


Fig. 5.33. Compara de la deformación de una probeta con entalla del 1% para distintas velocidad.
Colocadas de superior a inferior son: 10 m/s, 8 m/s, 5 m/s, 1 m/s, 0.25 m/s y 0,1 m/s.

Como nota diferenciadora del resto de probetas, se puede observar como, con una velocidad de 0,25 m/s, la rotura de la probeta vuelve a producirse cerca de la zona de carga. Al introducir una entalla en la probeta, se producen lugares con inestabilidades diferentes de los que, a priori, se puedan pensar. Una vez se introduce concentradores de tensiones en una probeta tienden a suceder inestabilidades como estas, pues ya se pierde el estado de simetría de forma.

La influencia de la velocidad en la deformación a lo largo de la probeta es también alta para las probetas con entalla, ya que al igual que en las probetas sin entalla, dependiendo de la velocidad de carga, se puede tener una deformación que solo afecte a una zona o una deformación repartida a lo largo de la probeta.

Como se puede apreciar en las figuras 5.34 y 5.35, la deformación existente en la probeta se realiza en lugares diferentes ya que para una velocidad de 8 m/s existe un cambio en el lugar de la localización de las inestabilidades y se encuentra una deformación a cada lado de la probeta, sin embargo, para una velocidad de 1 m/s, la deformación de la probeta se localiza en el centro de la misma, justo donde reside la entalla, siendo nula en el resto de la probeta.

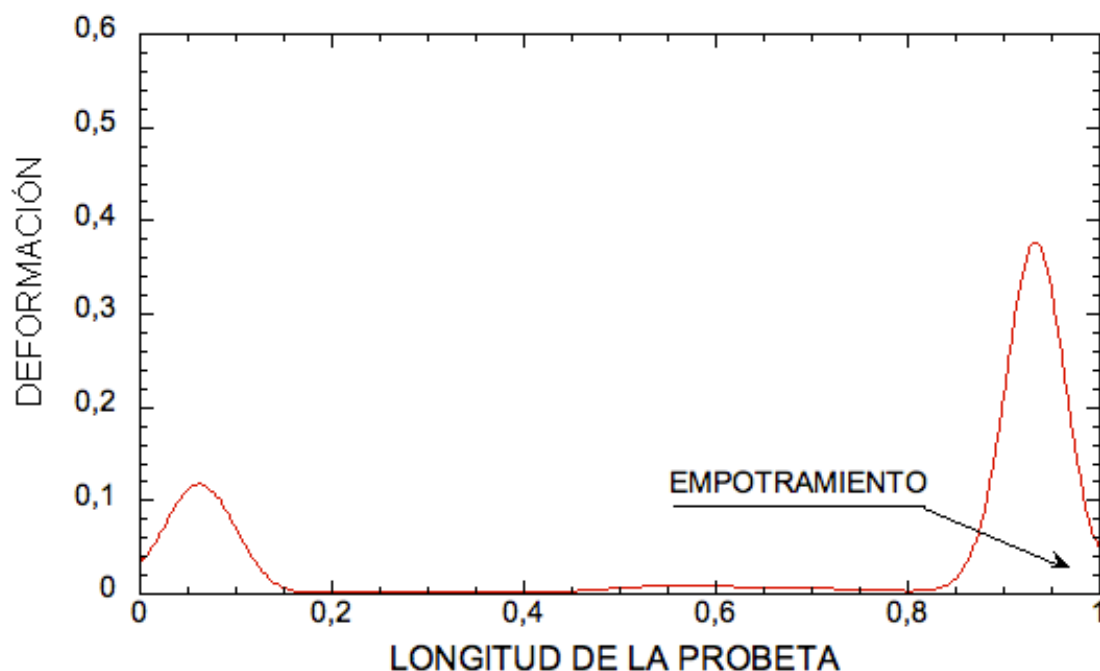


Fig. 5.34. Deformación a lo largo de una probeta con entalla del 1% con una velocidad de 8 m/s.

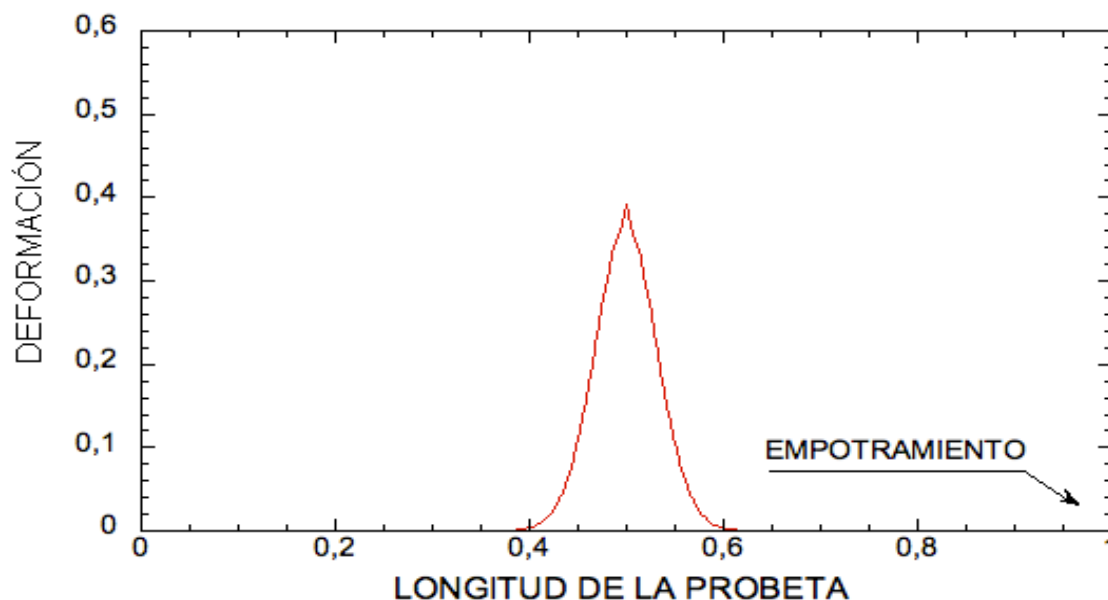


Fig. 5.35. Deformación de una probeta con entalla del 1% para una velocidad de 0.1 m/s.

La influencia de la velocidad en las probetas con entalla del 7% al 1% en las gráficas de tensión-deformación es igual que en las probetas sin entalla, ya que a menor velocidad, todas las interferencias se van perdiendo. En la figura 5.35 se puede apreciar la diferencia que existe entre altas y bajas velocidades, y como a bajas velocidades, la gráfica tensión-deformación no muestra inestabilidades.

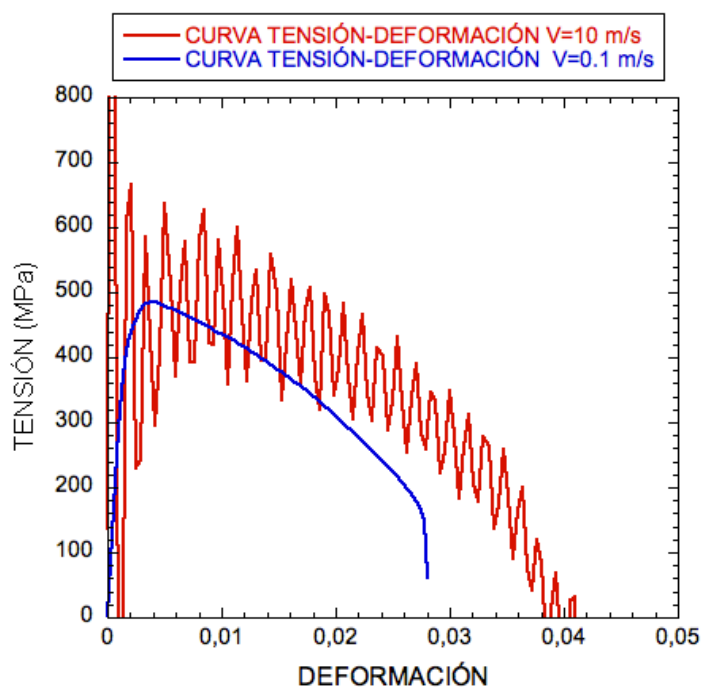


Fig. 5.36. Gráfica de tensión-deformación para las velocidades de 10 m/s y 0.1 m/s.

5.3 OBSERVACIONES

Los estudios realizados para probetas con condición de carga han revelado que las inestabilidades puede llegar a formarse fuera de la entalla. La presencia de un punto débil, un concentrador de tensiones en la estructura no será necesariamente el punto por el que rompa la probeta cuando aplicamos altas cargas. Además, para velocidades aplicadas idénticas e igual posición de la entalla, pero con diferentes tamaños de entalla, los resultados son bastantes parecidos, fortaleciendo así, la idea de que la formación de la estricción se puede localizar fuera de la entalla.

La influencia de la entalla en la localización de las inestabilidades cuando aplicamos cargas a la probeta es muy alta, ya que dependiendo del tamaño de la entalla, ésta producirá, para una misma velocidad, que un probeta rompa por la entalla o fuera de ella. En la tabla 5.1 se muestra a la velocidad mínima a la que la probeta rompe por la entalla.

tamaño de entalla/velocidad	Entall a 1%	Entall a 2%	Entall a 3%	Entall a 4%	Entall a 5%	Entall a 6%	Entall a 7%	Entall a 8%	Entall a 9%	Entall a 10%
10 m/s								x	x	x
8 m/s							x	x	x	x
3.75 m/s						x	x	x	x	x
2.25 m/s					x	x	x	x	x	x
2 m/s				x	x	x	x	x	x	x
1.5 m/s			x	x	x	x	x	x	x	x
0.25 m/s		x	x	x	x	x	x	x	x	x
0.1 m/s	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabla. 5.1. Velocidad a la que rompe por la entalla en las distintas probetas.

La influencia de la entalla en las gráficas de tensión y deformación a lo largo de la probeta se estudiará comparando éstos parámetros, a velocidad de 10 m/s, para distintas entallas en las figuras 5.37 – 5.48.

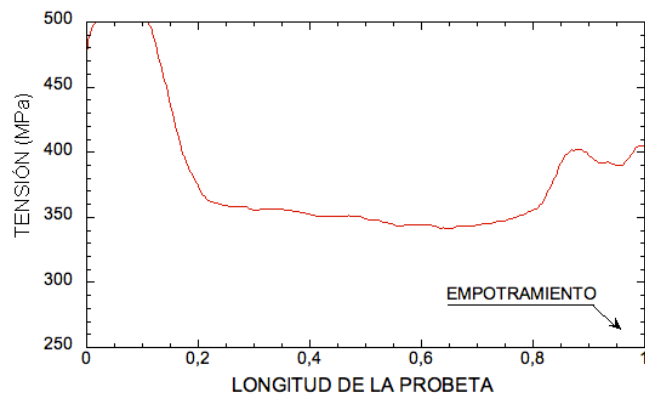


Fig. 5.37. Tensión en una probeta sin entalla.

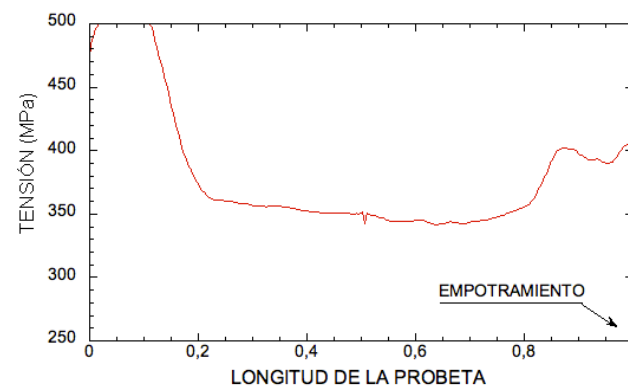


Fig. 5.38. Tensión en una probeta con entalla del 1%.

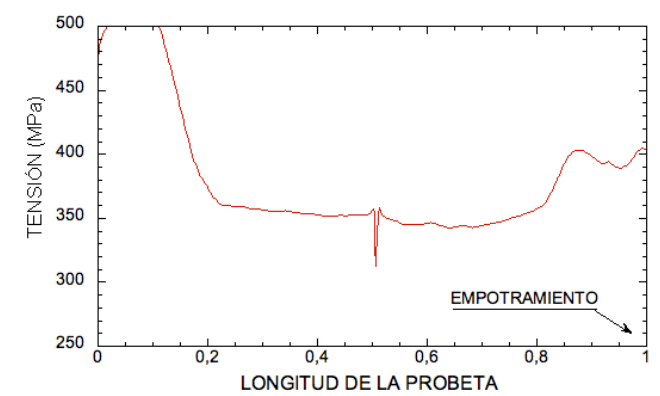


Fig. 5.39. Tensión de una probeta con entalla del 2%.

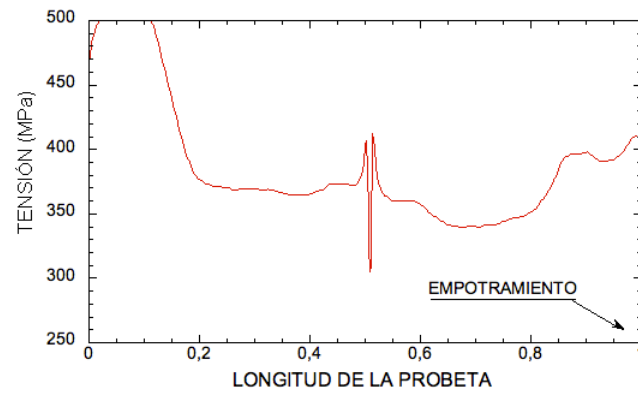


Fig. 5.40. Tensión en una probeta con entalla del 6%.

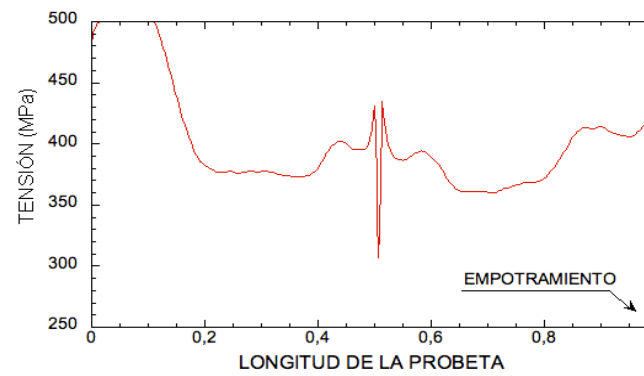


Fig. 5.41. Tensión en una probeta con entalla del 7%.

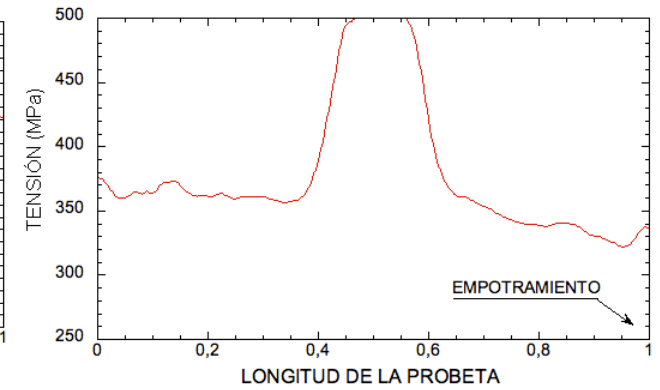


Fig. 5.42. Tensión en una probeta con entalla del 8%.

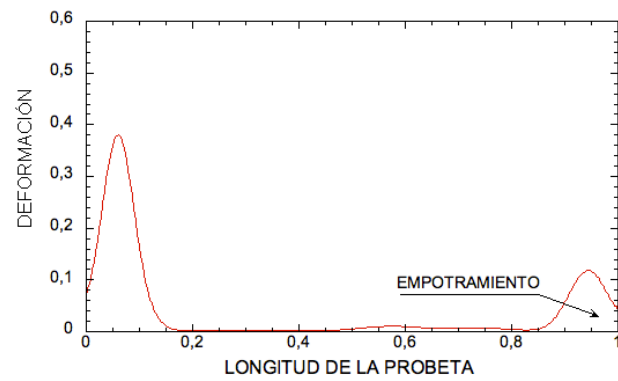


Fig. 5.43. Deformación en una probeta sin entalla.

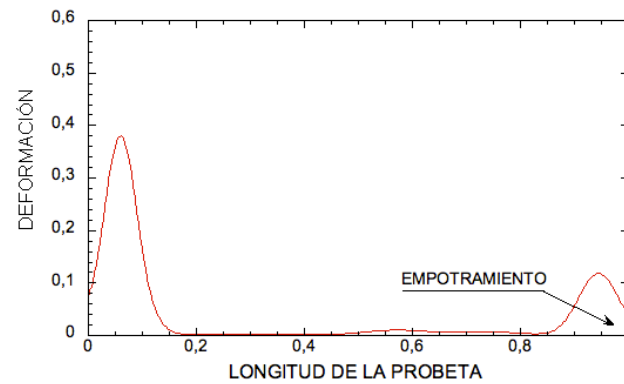


Fig. 5.44. Deformación de una probeta con entalla del 1%.

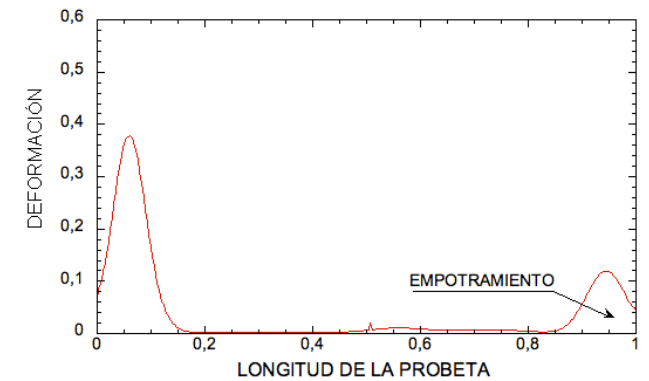


Fig. 5.45. Deformación en una probeta con entalla del 2%.

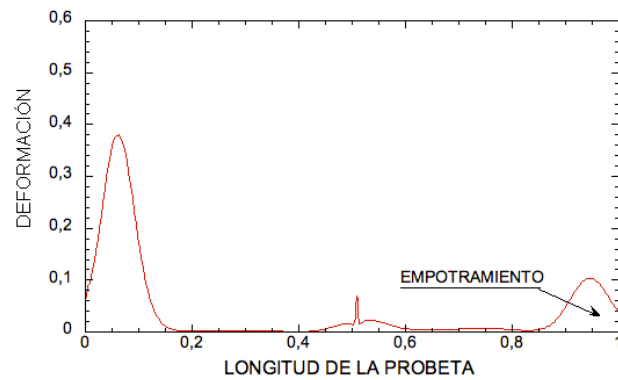


Fig. 5.46. Deformación en una probeta con entalla del 6%.

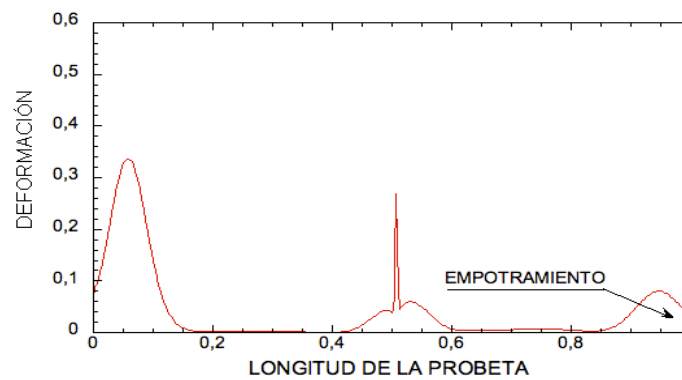


Fig. 5.47. Deformación de una probeta con entalla del 7%.

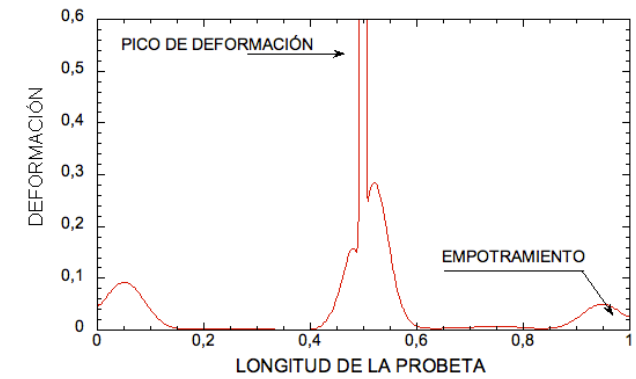


Fig. 5.48. Deformación de una probeta con entalla del 8%.

Una entalla en una probeta es capaz de cambiar por completo tanto las gráficas de tensión como las gráficas de deformación, como se puede comprobar en las figuras anteriores. Se observa como al ir aumentando el tamaño de la entalla esta tiene mayor influencia en las gráficas, llegando a tener en la entalla del 8% la mayor inestabilidad de la probeta, ya que de una deformación nula en la probeta sin entalla, pasa a tener una deformación muy notoria.

La influencia de la entalla en las gráficas de tensión-deformación queda en un segundo plano debido a las cargas en la probeta.

Tanto para altas, (fig. 5.49), como para bajas velocidades, (fig. .50), existe una diferencia entre las curvas de tensión-deformación de las diferentes probetas cuando la deformación es superior al 0.02 ya que a partir de esta deformación la tensión necesaria para deformar la probeta es menor para las que tienen entalla. Además, como diferencia fundamental, es que al llegar a una deformación de 0.04 para altas velocidades y 0.03 para bajas, la probeta sin entalla rompe, mientras que la probeta con entalla aún están cargadas, por lo que se necesitará una mayor deformación para la rotura.

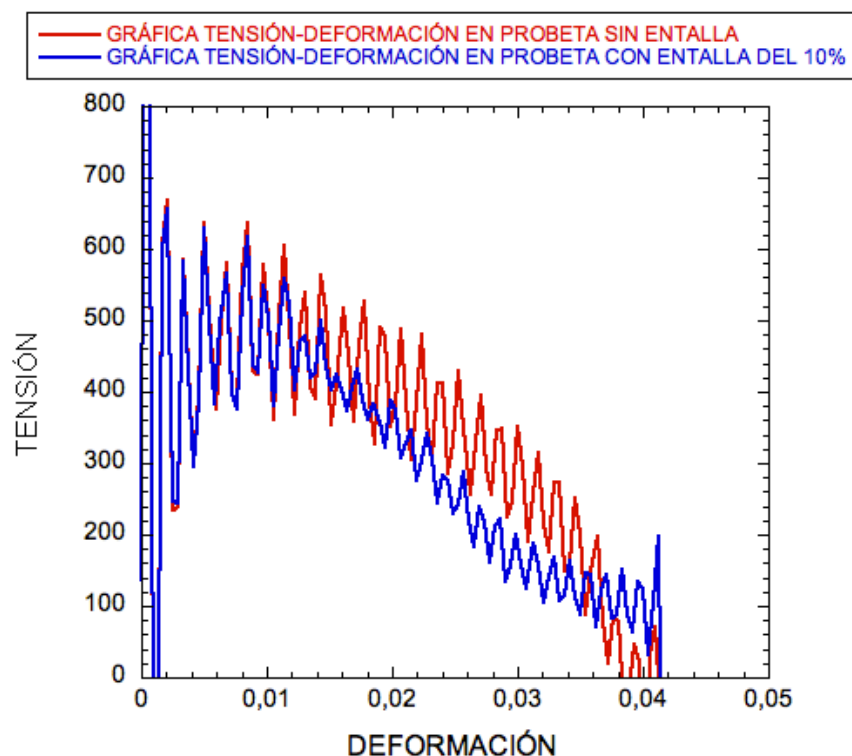


Fig. 5.49. Comparación de las graficas tensión-deformación para una velocidad de 10 m/s.

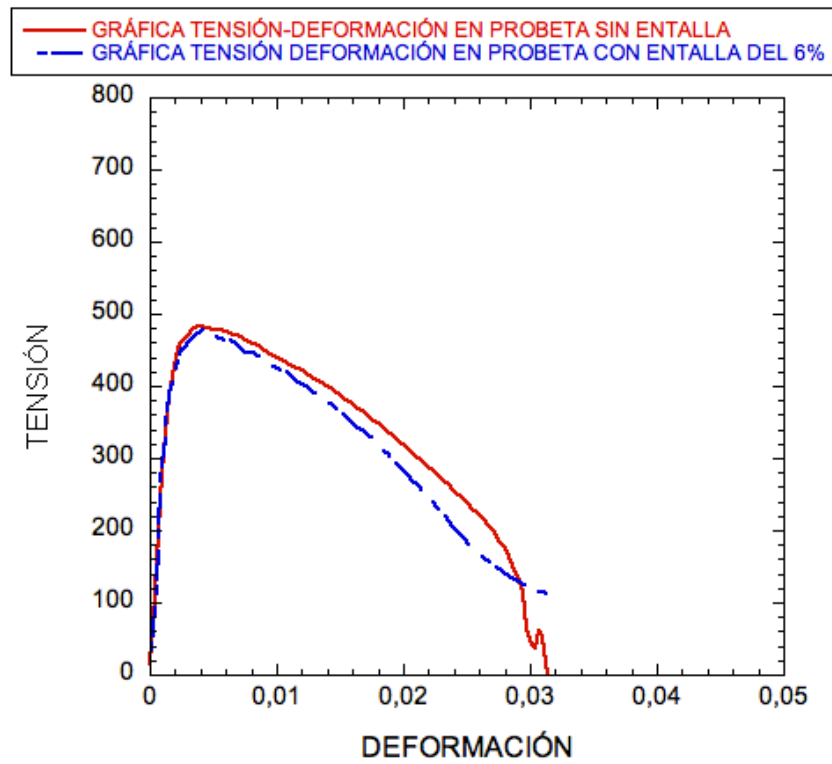


Fig. 5.50. Comparación de las gráficas tensión deformación para una velocidad de 1 m/s.

6. RESULTADOS: EL PAPEL DE LA INERCIA EN LA LOCALIZACIÓN DE LAS INESTABILIDADES

Este apartado muestra los resultados de la localización de las inestabilidades en una probeta con condiciones iniciales, logrando así, que no se produzcan ondas en el interior del material. Para ello se mantienen todos los parámetros del modelo numérico a excepción de la velocidad, que irá variando para que se haga notoria su influencia en los resultados finales.

A diferencia con el apartado anterior, la aparición de la tensión en la probeta no se realiza a través de ondas, sino que es constante en toda la sección de la probeta, aumentando por igual en toda ella. Esto se debe a que existe una velocidad lineal desde el extremo empotrado hasta el extremo libre de la probeta variando sus valores desde $V=0$ hasta $V=V_0$.

El análisis de resultados se procederá de la siguiente forma.

- 1. Estudio de la inercia en la localización de inestabilidades en probetas sin entalla.

El papel de la condición inicial en probetas sin entalla, mostrando los cambios que se producen al cambiar la velocidad, con mayor atención a las similitudes y diferencias que se puedan encontrar.

- 2. *Estudio de la inercia en la localización de inestabilidades en probetas con entalla.*

El papel de la condición inicial en probetas con entalla, mostrando las diferencias que se producen al cambiar la velocidad de carga y el tamaño de la entalla.

- 3. *Observaciones.*

En este apartado se comparan los resultados obtenidos entre las probetas con entallas y las probetas sin entalla. Se buscará las diferencias y similitudes entre las distintas probetas con mismas velocidades.

6.1 LOCALIZACIÓN DE INESTABILIDADES EN PROBETAS SIN ENTALLA

Para la localización de inestabilidades en probetas sin entalla se han realizado una serie de simulaciones con velocidades de carga desde 0.1 m/s hasta 10 m/s.

El primer punto a destacar es la influencia de la velocidad en la localización de inestabilidades.

La creación de inestabilidades sólo puede producirse de manera simétrica, por lo que la influencia de la velocidad, para el caso de probetas sin entalla, no es muy alta, ya que para las velocidades estudiadas las inestabilidades se encuentran en el mismo lugar. En las imágenes propuestas la zona empotrada de la probeta es la zona transversal de la misma, que se encuentra en la zona superior derecha de la imagen, al igual que en las probetas con condición de carga.

Aunque la zona de localización de las inestabilidades es la misma para todas las velocidades, se observa en las figuras 6.1 y 6.2, que a menor velocidad, la zona deformada es menor.

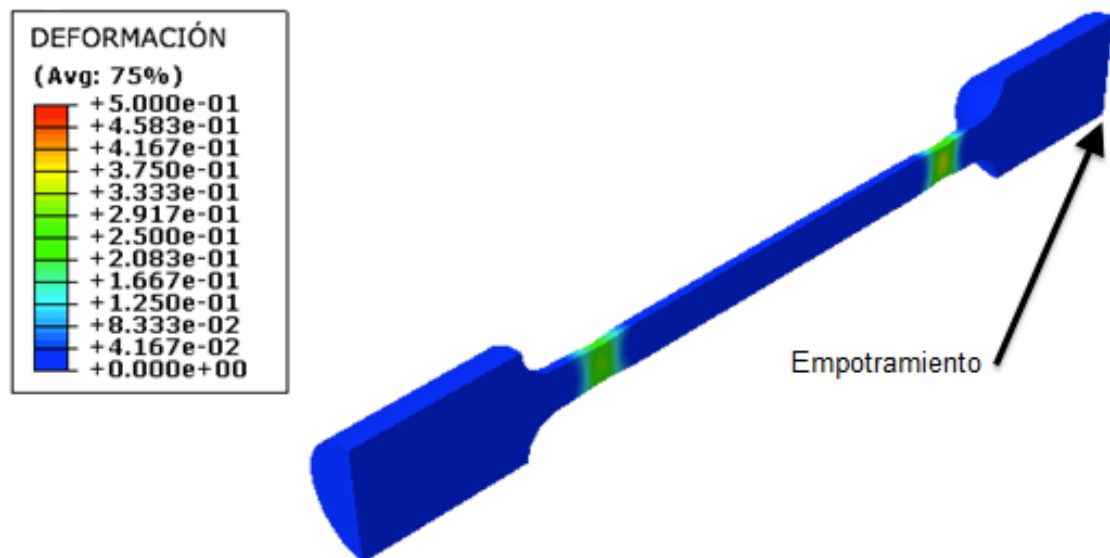


Fig. 6.1. Deformación de una probeta sin entalla con velocidad 10 m/s.

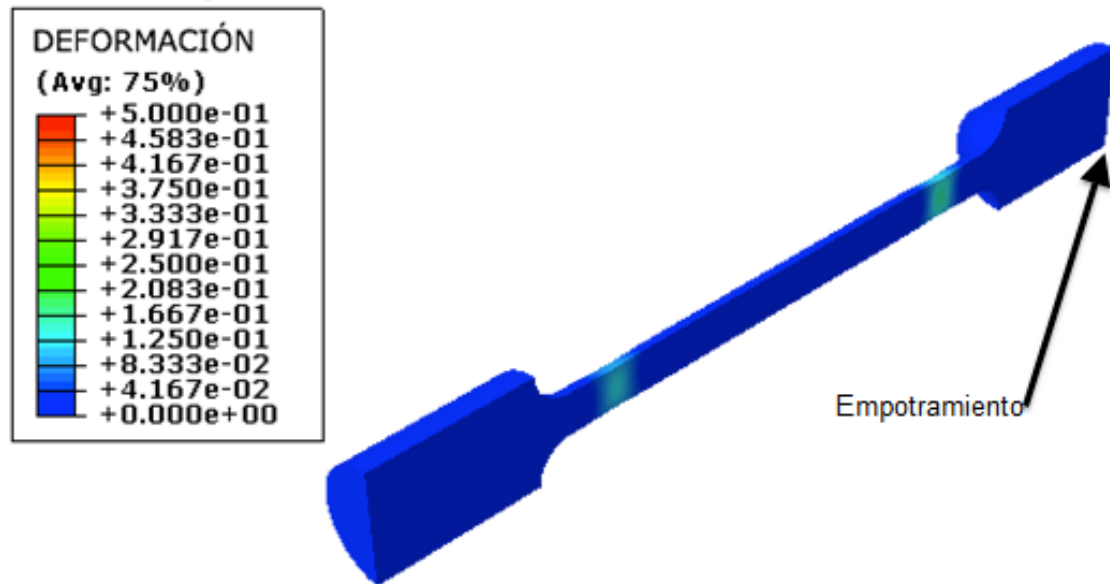


Fig. 6.2. Deformación de una probeta sin entalla con $V=5$ m/s.

Como la formación de inestabilidades en el caso inicial es simétrica, y para probetas sin entalla, la rotura no se realiza en el centro, existen dos puntos donde se localizan estas inestabilidades. Para casos reales, aunque puedan existir probetas con inestabilidad simétrica, finalmente estas se pronunciarán en uno de los dos lugares llegando a la rotura en él.

Aunque para la velocidad de 0.1 m/s la rotura no se produzca en el centro de la probeta, existe una velocidad a partir de la cual, la inestabilidad se forma en el centro de ella. Esto se debe a que con una velocidad lo suficientemente baja, la simulación se comporta como si estuviese en un estado de simetría de cargas y al igual que para probetas con condición de cargas se podrá aplicar la segunda ley de Newton y deducir por ella que la rotura se produce en el centro de la probeta.

El segundo punto a destacar es la influencia de la velocidad en la tensión y en la deformación a lo largo de la probeta (fig.6.3 y fig.6.4). Como la localización de las inestabilidades se produce en las mismas zonas, las curvas de tensión y deformación no se diferenciarán mucho entre unas y otras velocidades.

Al igual que en el apartado anterior estas tanto las graficas de tensión y deformación a lo largo de la probeta se realizarán para una deformación del 1.5%.

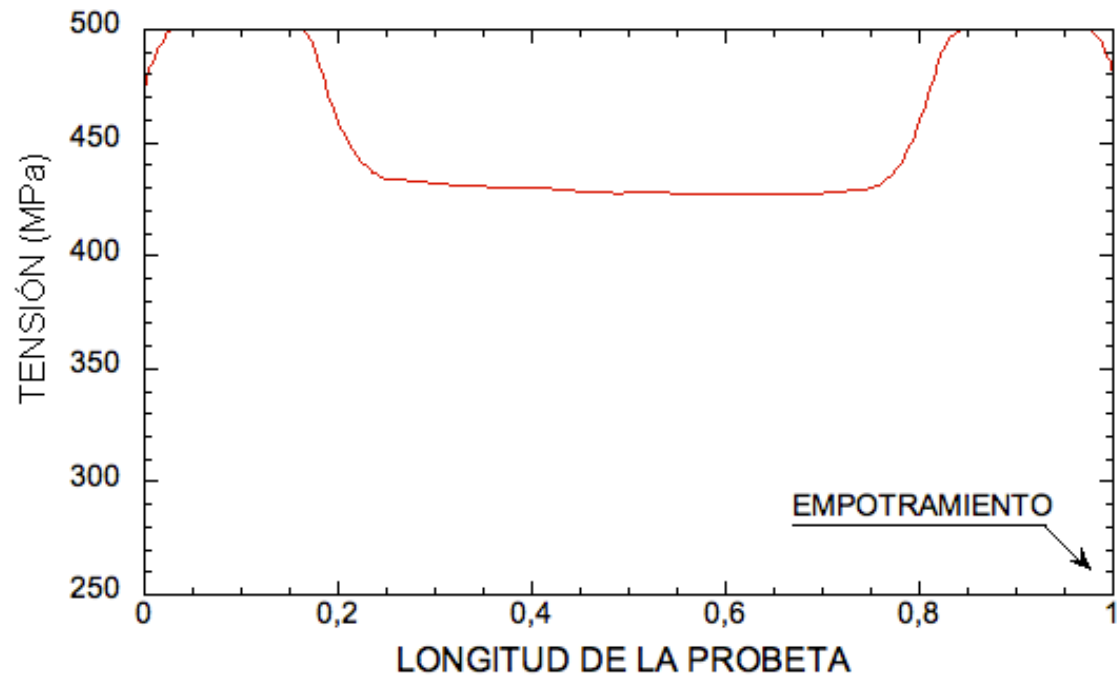


Fig. 6.3. Tensión a lo largo de una probeta sin entalla con $V=10$ m/s.

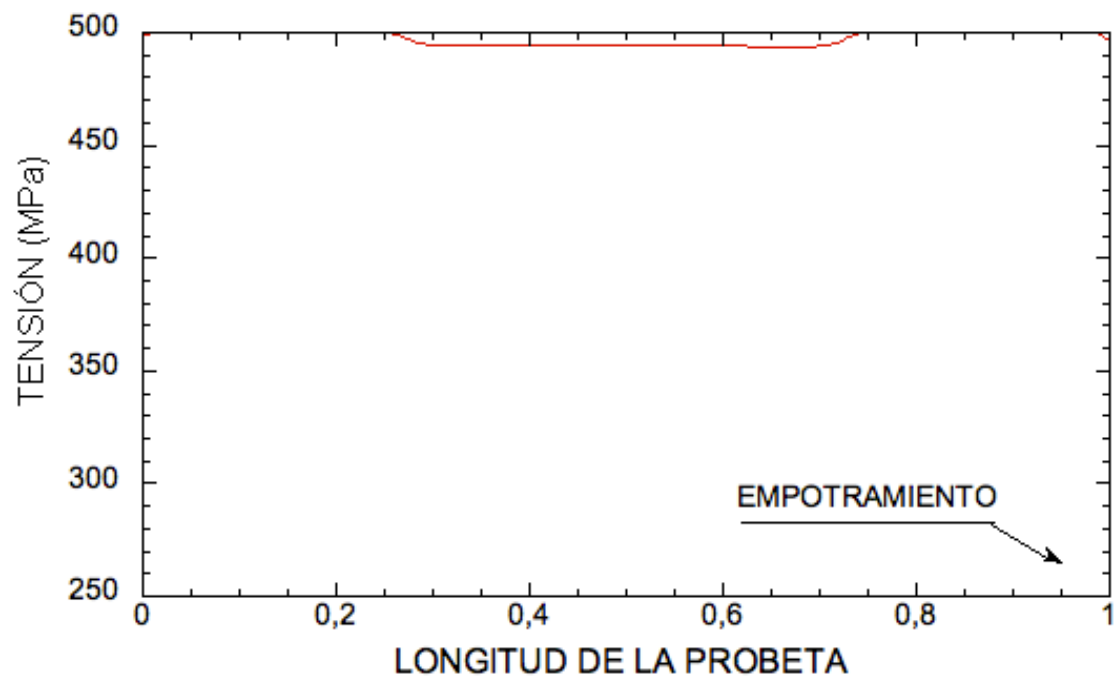


Fig. 6.4. Tensión a lo largo de una probeta sin entalla con $V=1$ m/s.

Las curvas de tensión a lo largo de una probeta para velocidades de 10 m/s y 1 m/s, son similares. La única diferencia apreciable reside en la carga que sufre en los lugares donde no se muestran las inestabilidades, pues se puede observar como a una velocidad de 1 m/s está mas cargada que a velocidad de 10 m/s.

Para las curvas de deformación (fig.6.5 y fig.6.6), al igual que para las curvas de tensión a lo largo de la probeta, existen pocas diferencias aunque exista una diferencia de velocidad entre las figuras de 9m/s. Esto se debe a, como se expresó anteriormente, la formación de las inestabilidades y posterior rotura se produce en el mismo lugar.

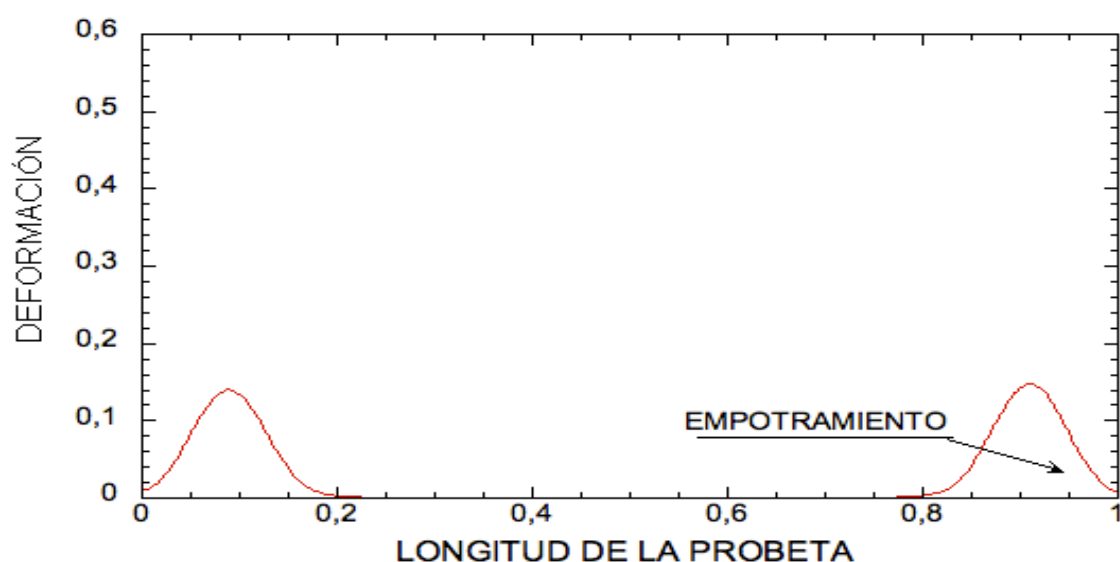


Fig. 6.5. Deformación a lo largo de una probeta sin entalla con $V=10$ m/s.

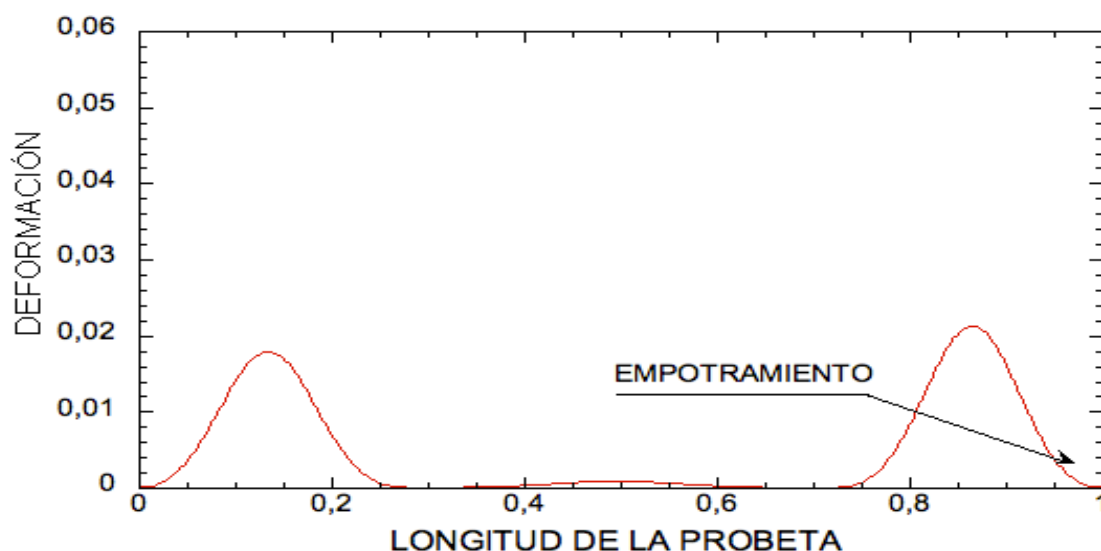


Fig. 6.6. Deformación a lo largo de una probeta sin entalla con $V=1$ m/s.

El último punto a destacar en probetas sin entalla con carga inicial es la influencia de la velocidad en las gráficas tensión-deformación que se puede apreciar en las figuras 6.7 – 6.9. Al igual que para las probetas con condición de carga, al altas velocidades, en las gráficas de tensión-deformación, se producen unas distorsiones en la curva, esto se debe a que no estamos en un caso de simetría de cargas por lo que no existe un equilibrio de fuerzas en la probeta.

Cuando disminuimos la velocidad de la simulación, las inestabilidades desaparecen de la curva, debido a que no estamos acercando al equilibrio de fuerzas.

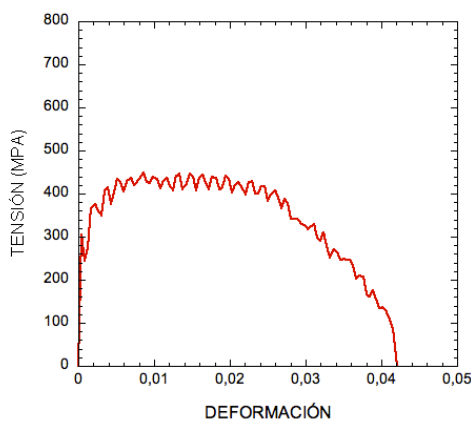


Fig. 6.7. Gráfica para una probeta con $V=10$ m/s.

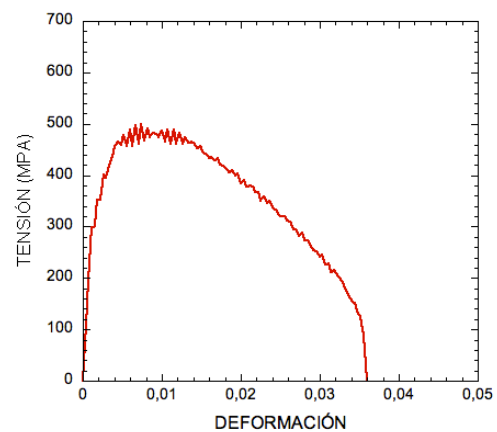


Fig. 6.8. Gráfica para una probeta con $v=5$ m/s.

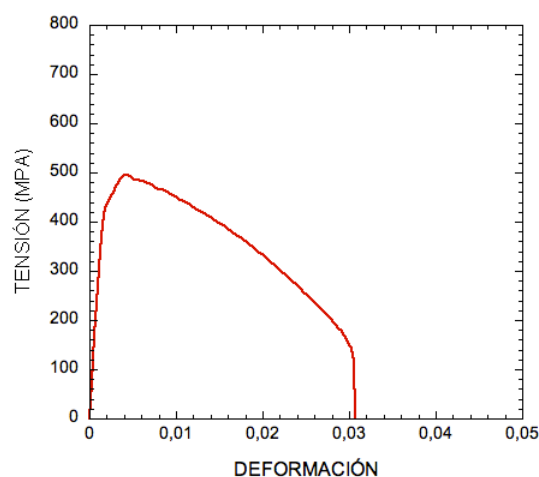


Fig. 6.9. Gráfica tensión-deformación para una probeta sin entalla con $V=1$ m/s.

Aún con las distorsiones se puede observar cómo en la curva tensión-deformación se produce un cambio, por lo que la influencia de la velocidad en estas gráficas es alta. Al comparar las gráficas de tensión-deformación entre las velocidades 10 m/s y 1 m/s en la figura 6.10 se puede apreciar una diferencia en el eje de la deformación, pues se ve que al disminuir la velocidad y obtener una curva tensión-deformación sin distorsiones, la deformación baja un 25% en la curva de tensión-deformación de 1 m/s con respecto a la curva de tensión-deformación de 10 m/s.

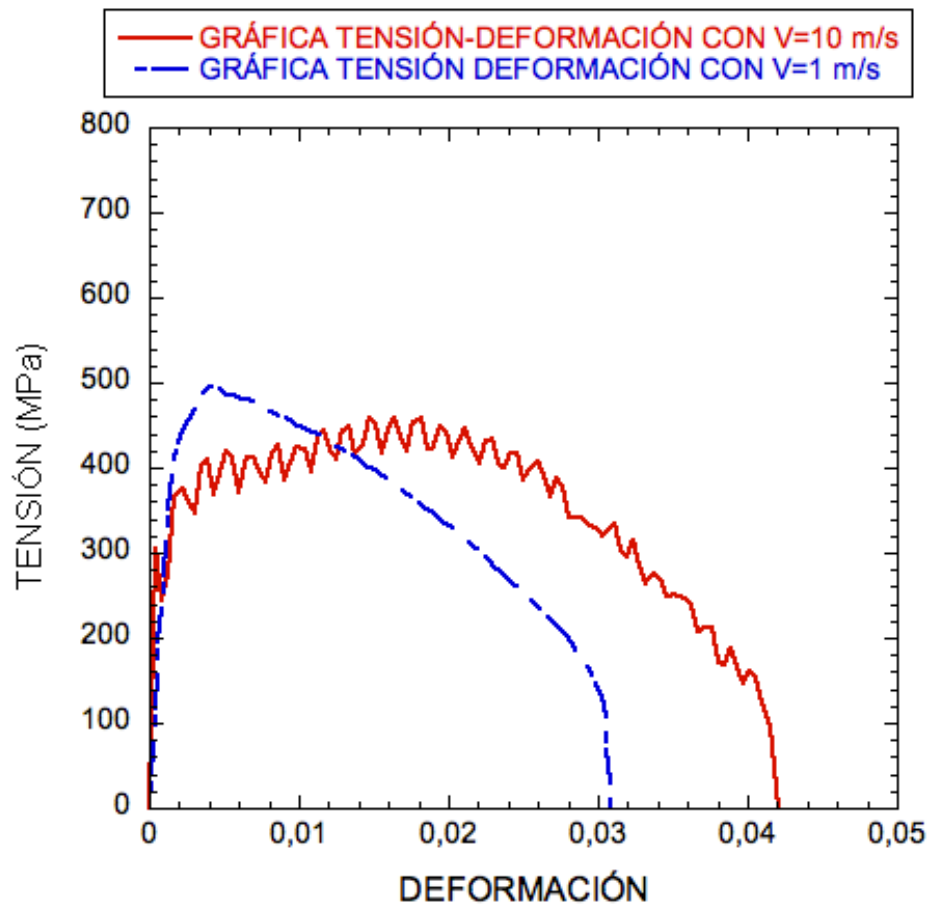


Fig. 6.10. Comparación de gráficas tensión-deformación para distintas velocidades. $V=10$ m/s, $V=1$ m/s.

6.2 LOCALIZACIÓN DE INESTABILIDADES EN PROBETAS CON ELLALLA

Al introducir una entalla en la probeta, el lugar en el que se encuentra ésta se convierte en un concentrador de tensiones, logrando influir en el resultado de las simulaciones. Para el estudio de probetas con entalla con condición inicial se han realizado simulaciones en probetas con entallas de tamaño desde 1% hasta el 10% del radio de éstas. Al igual que para las probetas con condición de carga del apartado 4.2, establecemos una diferencia para las probetas con una entalla del 10% al 7% con respecto a las probetas con entalla del 6% al 1%.

6.2.1 PROBETAS CON ENTALLA DEL 10%, AL 7%

En el estudio de las probetas con entalla del 10% al 7%, con unas velocidades de hasta 10 m/s, las inestabilidades aparecen en el centro de la probeta, que es donde se encuentra la entalla como se puede apreciar en la figura 6.11. Este fenómeno se debe a que la entalla se ha convertido en un concentrador de tensiones tan alto que aún teniendo velocidades de hasta 10 m/s, la probeta rompe por la entalla.

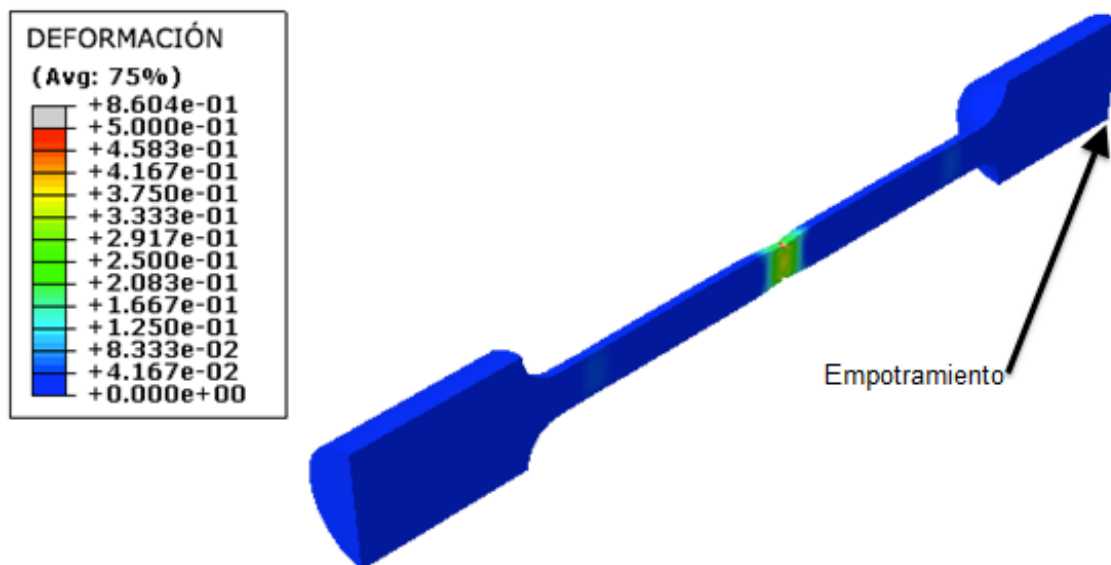


Fig. 6.11. Deformación en una probeta con entalla del 7% con $V=10$ m/s.

La influencia de la velocidad en la deformación de una probeta con entalla del 7% del radio o superior, no es muy alta ya que la formación de las inestabilidades se producen en el mismo lugar. Aún así, se pueden apreciar diferencias en las gráficas.

Se puede observar en las figuras 6.12 y 6.13 como a la velocidad de 1 m/s la deformación está definida en su totalidad en la entalla, mientras que a velocidad de 10 m/s existe deformación también en otros puntos de la entalla.

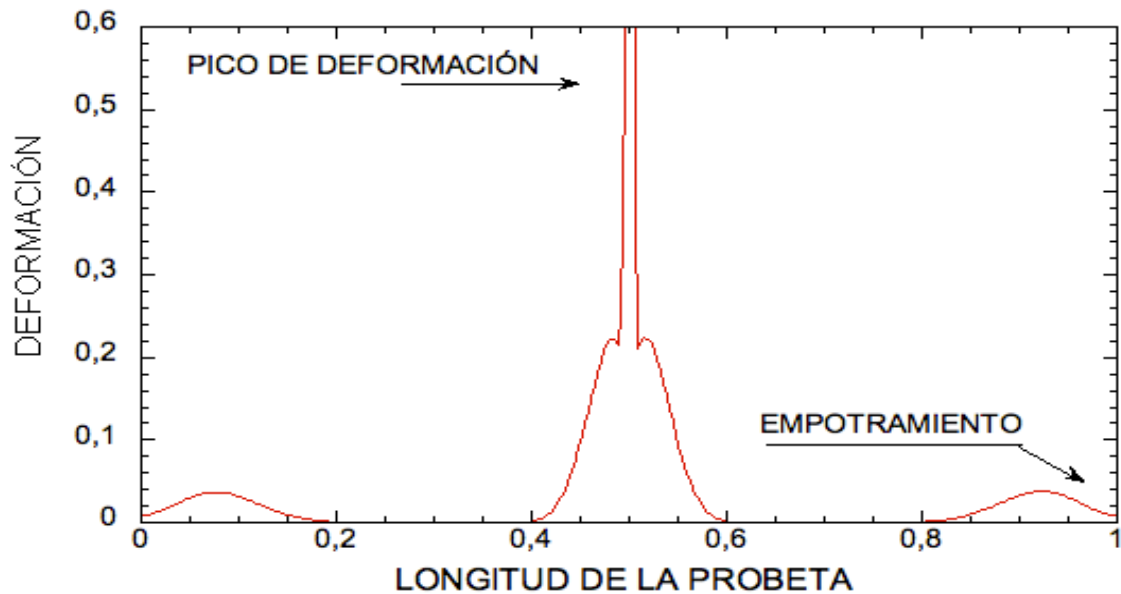


Fig. 6.12. Deformación a lo largo de la probeta con entalla del 7% con $V=10$ m/s.

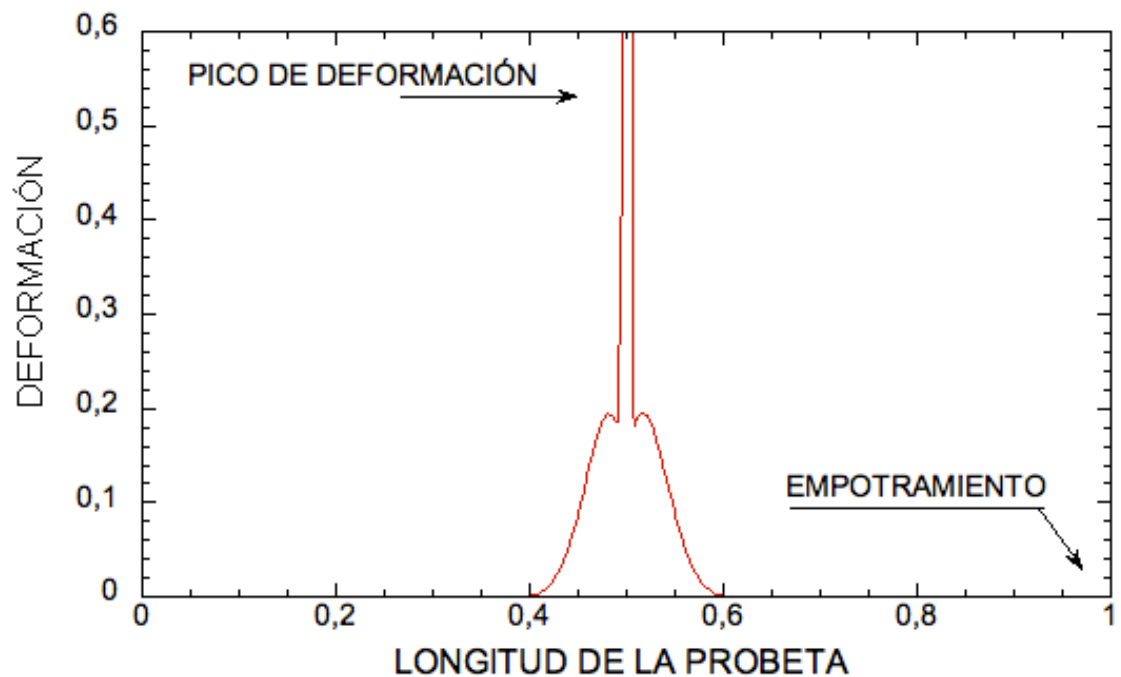


Fig. 6.13. Deformación a lo largo de la probeta con entalla del 7% con $V=1$ m/s.

La curva tensión-deformación se verá influenciada por la velocidad de la deformación, ya que al igual que en todos los caso anteriores, a altas velocidades se producen una serie de distorsiones que al disminuir la velocidad desaparecen.

En la figura 6.14 se observa un ejemplo de lo citado anteriormente, ya que se comparan las curvas tensión-deformación para las velocidades de 10m/s y 1m/s, viendo cómo para la velocidad de 1m/s todas las distorsiones desaparecen.

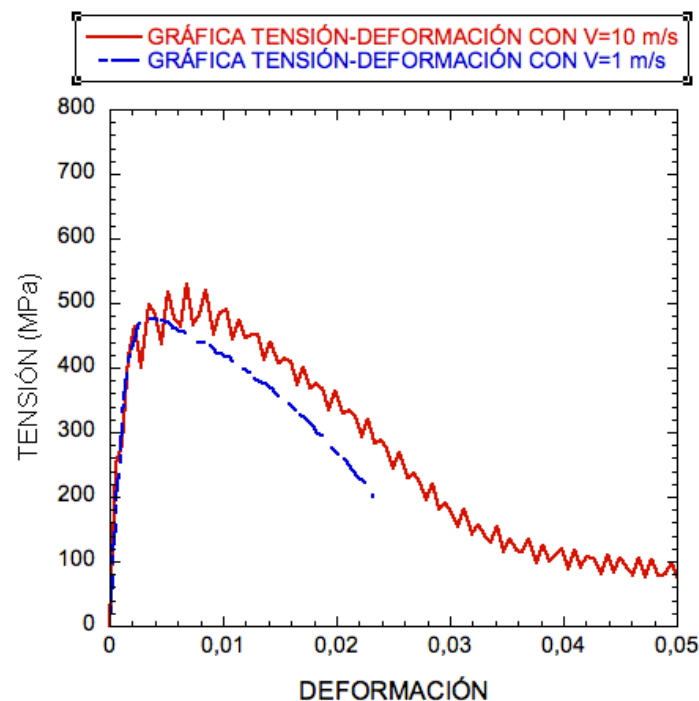


Fig. 6.14. Comparativa de las gráficas tensión-deformación para una probeta con entalla del 7%.

Al disminuir la entalla de la probeta se produce un cambio en la localización de las inestabilidades, ya que al disminuir la entalla, se reduce el efecto de ésta como concentrador de tensiones produciendo que la entalla ya no sea el factor mas determinante para producirse la rotura.

6.2.2 PROBETAS CON ENTALLA DEL 6%, AL 1%

Para probetas con entalla del 6% al 1% la localización de las inestabilidades y posterior rotura puede producirse fuera de la entalla, por lo que la influencia de la velocidad en la formación de la entalla es alta, ya que puede cambiar el punto de rotura de la probeta.

Para bajas velocidades la rotura de la probeta se producirá por la entalla, ya que actúa como un concentrador de tensiones, pero para velocidades lo suficientemente altas, las inestabilidades lograrán producirse fuera de la entalla debido a que las cargas introducidas en la probeta generan tensiones muy altas.

En la figura 6.15 se muestra cómo, para bajas velocidades, la probeta rompe por la entalla mientras que en la figura 6.16 se muestra que al aumentar la velocidad, las inestabilidades y posterior rotura se produzcan fuera de la entalla.

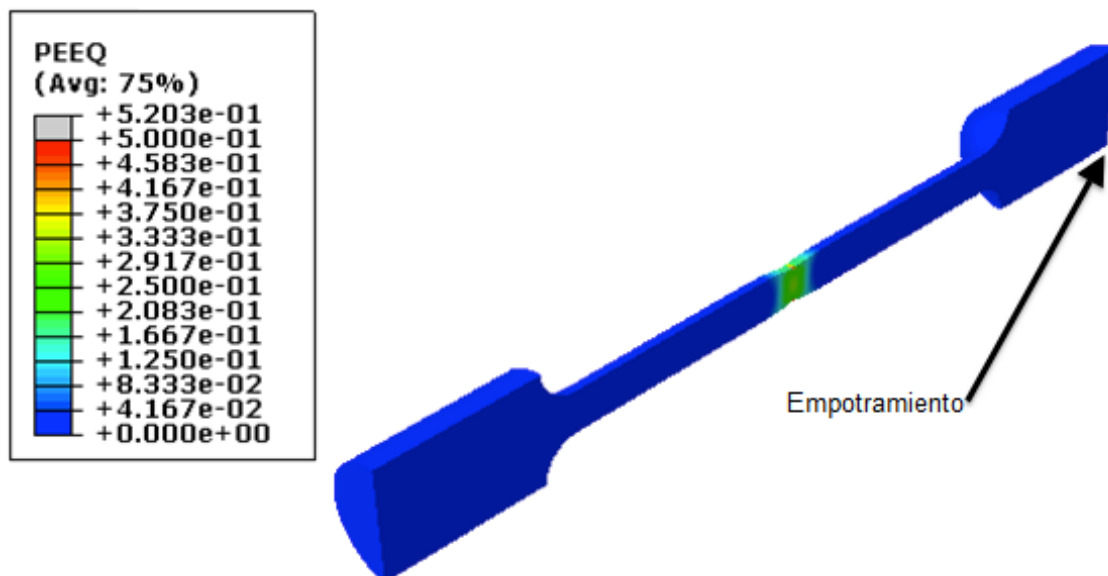


Fig. 6.15. Deformación en una probeta con entalla del 5% con $V=3$ m/s.

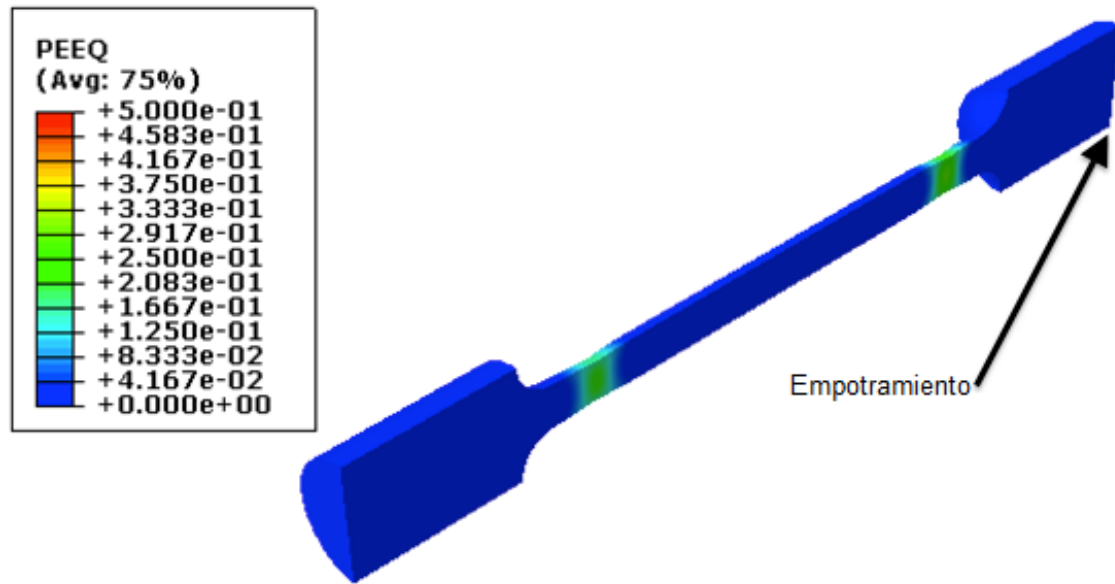


Fig. 6.16. Deformación en una probeta con entalla del 5% con $V=10$ m/s.

La influencia de la velocidad en las gráficas de la tensión y la deformación a lo largo de una probeta es alta, ya que para el mismo tamaño de entalla las inestabilidades de la probeta pueden producirse en diferentes lugares cuando se modifica la velocidad de carga.

En las figuras 6.17 y 6.18 se muestran los cambios en dichas gráficas. Como se observa, los picos donde se encuentran las inestabilidades cambian. Para bajas velocidades sólo existe uno central, mientras que al aumentar la velocidad se convierten en dos en los laterales de la probeta, compartiendo así al deformación entre las dos inestabilidades.

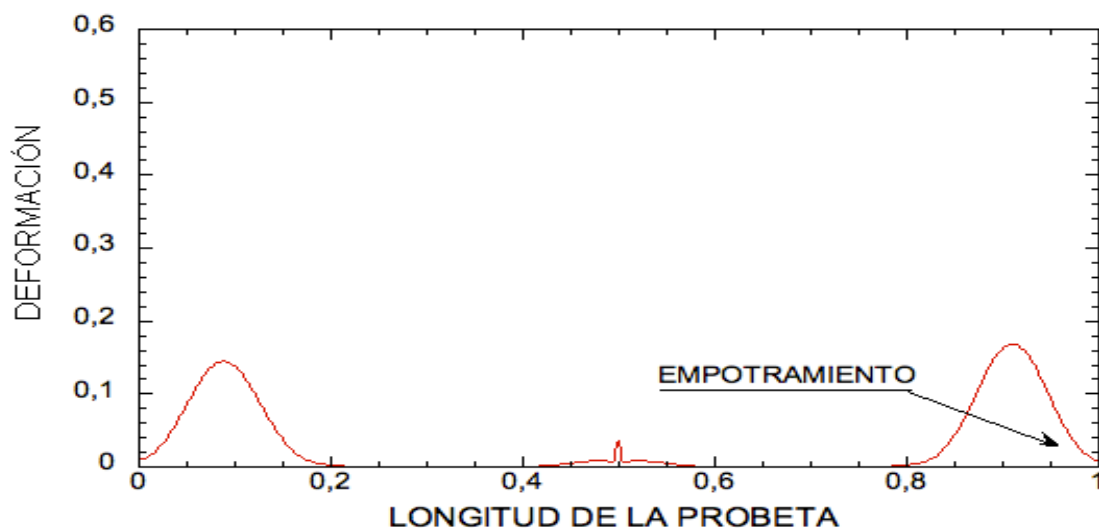


Fig. 6.17. Deformación a lo largo de una probeta con entalla del 5% con $v=10$ m/s.

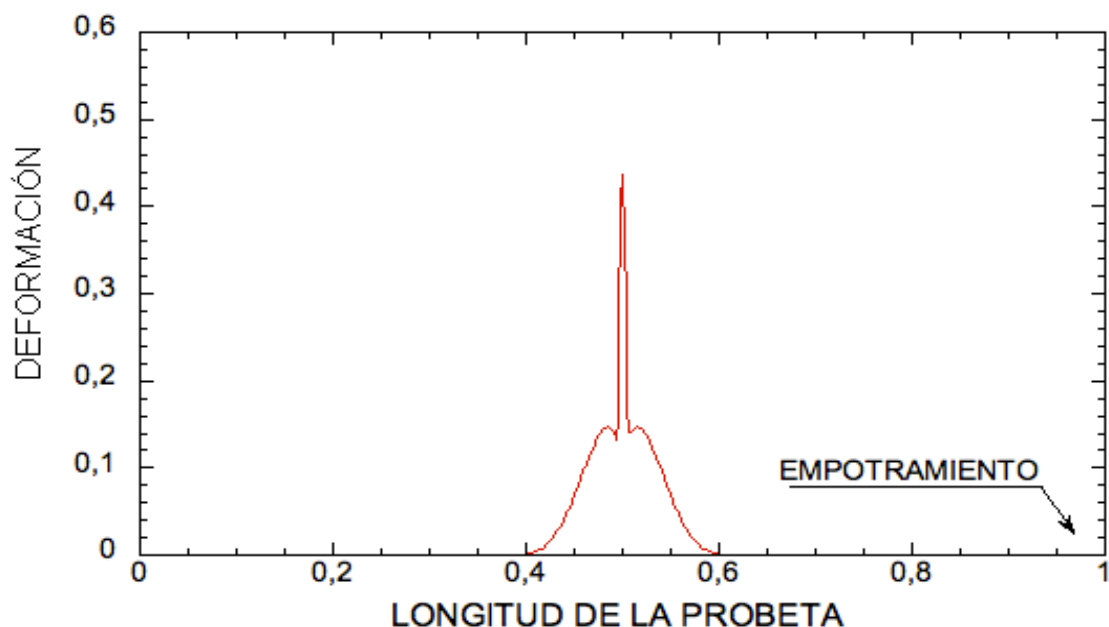


Fig. 6.18. Deformación a lo largo de una probeta con entalla del 5% con $v=3$ m/s.

Un cambio en la velocidad implica, como para todos los casos anteriores, cambios en las gráficas tensión-deformación. Como se aprecia en la figura 6.19, la deformación máxima de la probeta baja visiblemente cuando se tiene una velocidad menor, con respecto a la mayor. Y al igual que para los casos anteriores a altas velocidades existen unas distorsiones que desaparecen al disminuir la velocidad.

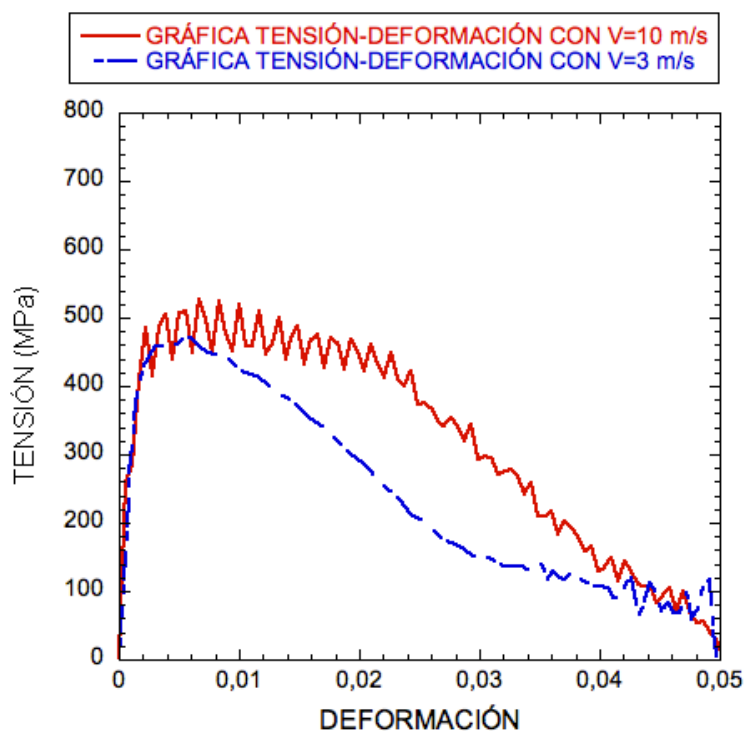


Fig. 6.19. Comparación curvas tensión-deformación en probetas con entalla del 5%.

6.3 OBSERVACIONES

Los estudios realizados para probetas con condición inicial han revelado que las inestabilidades puede llegar a formarse fuera de la entalla. Al igual que para las probetas con condición de carga, la presencia de un punto débil en la estructura no será necesariamente el punto por el que se rompa la probeta cuando aplicamos altas cargas.

La influencia de la entalla en la localización de las inestabilidades cuando aplicamos cargas a la probeta es muy alta, ya que dependiendo del tamaño de la entalla, ésta producirá que, para una misma velocidad, una probeta rompa por la entalla o fuera de ella. En la tabla 6.1 se muestra la velocidad mínima a la que la probeta rompe por la entalla.

tamaño de entalla/ velocidad	Entalla a 1%	Entalla a 2%	Entalla a 3%	Entalla a 4%	Entalla a 5%	Entalla a 6%	Entalla a 7%	Entalla a 8%	Entalla a 9%	Entalla a 10%
10 m/s							x	x	x	x
9.7 m/s						x	x	x	x	x
9.4 m/s					x	x	x	x	x	x
9.1 m/s				x	x	x	x	x	x	x
8.8 m/s			x	x	x	x	x	x	x	x
8.5 m/s		x	x	x	x	x	x	x	x	x
8.2 m/s	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabla. 6.1. Velocidad a la que rompe por la entalla en las distintas probetas.

La influencia de la entalla en las gráficas de deformación a lo largo de la probeta se estudiará comparando éstos parámetros, a velocidad de 10 m/s, para distintas entallas en las figuras 6.20 – 6.27.

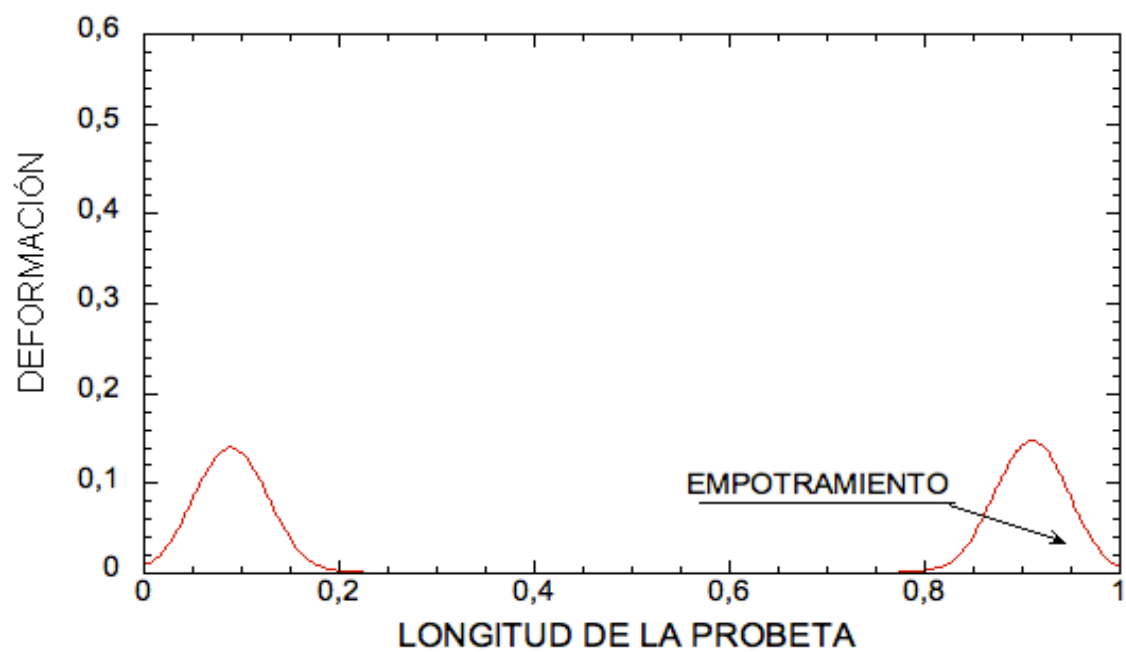


Fig. 6.20. Deformación a lo largo de una probeta sin entalla con $V=10$ m/s.

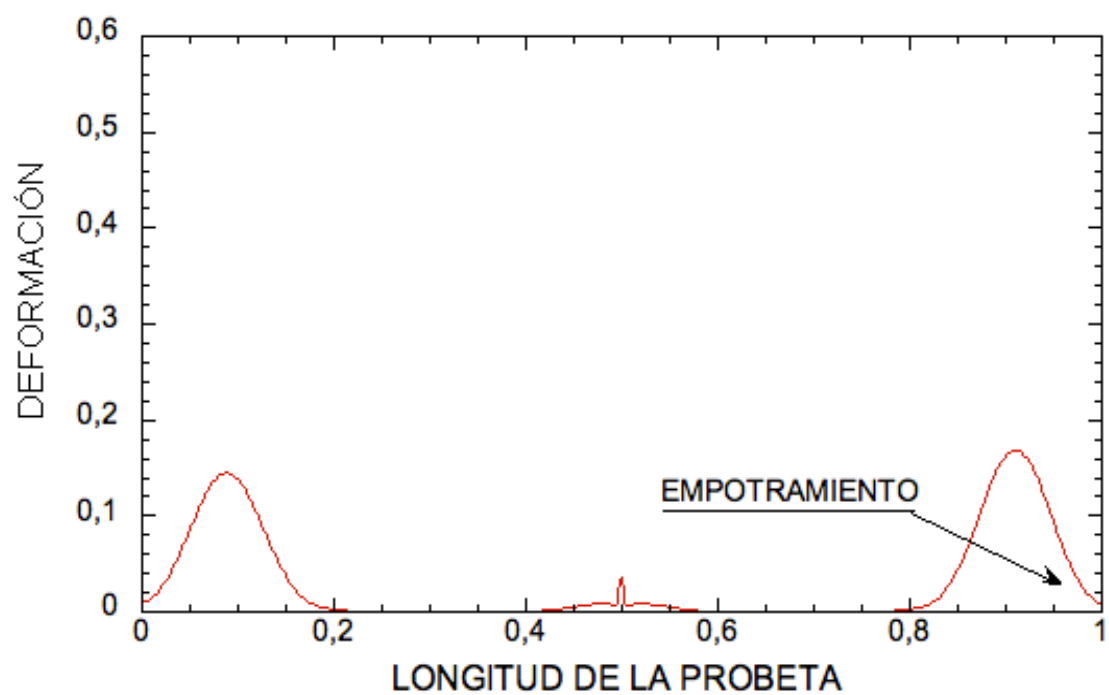


Fig. 6.21. Deformación a lo largo de una probeta con entalla del 5% con $v=10$ m/s.

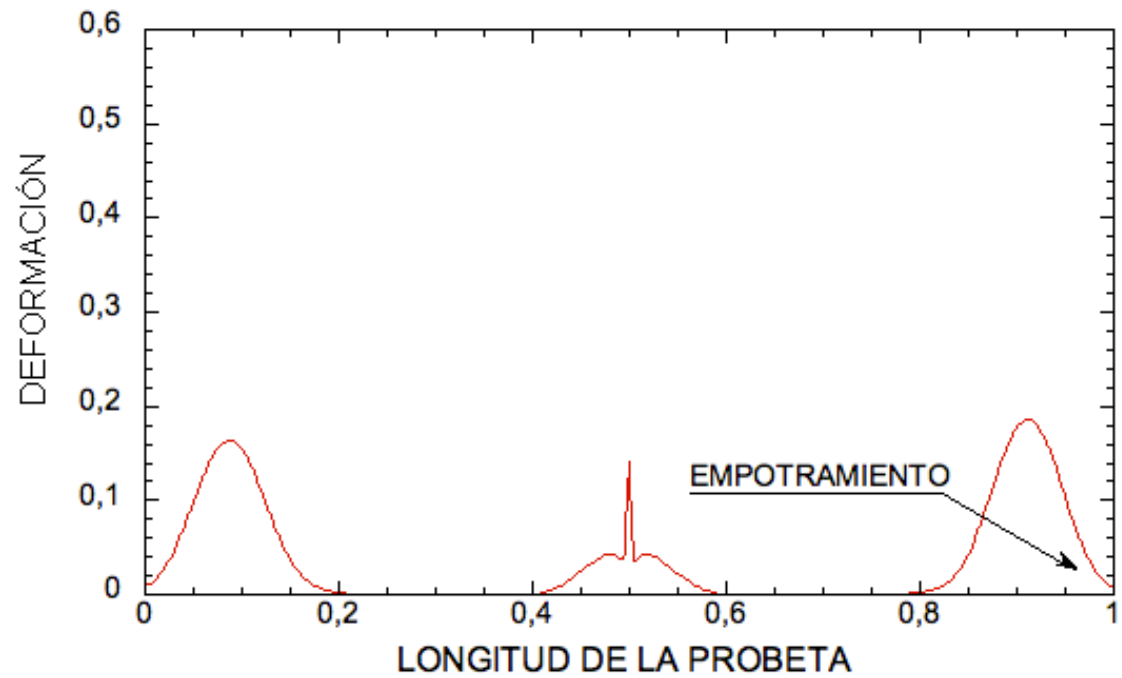


Fig. 6.22. Deformación a lo largo de una probeta con entalla del 6% con $V=10$ m/s.

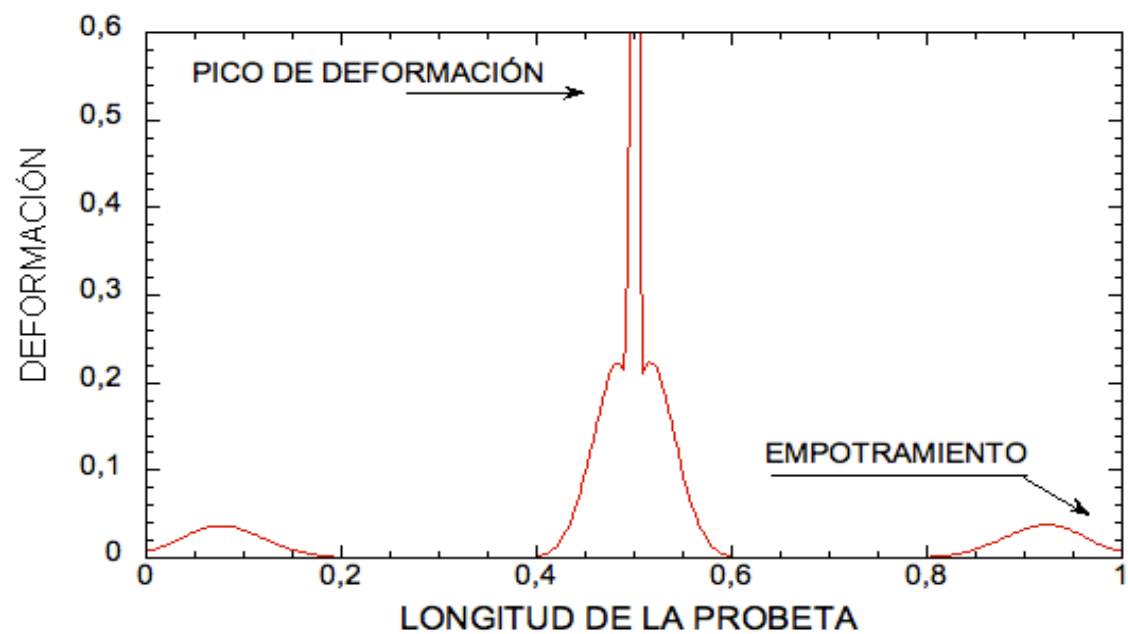


Fig. 6.23. Deformación a lo largo de la probeta con entalla del 7% con $V=10$ m/s.

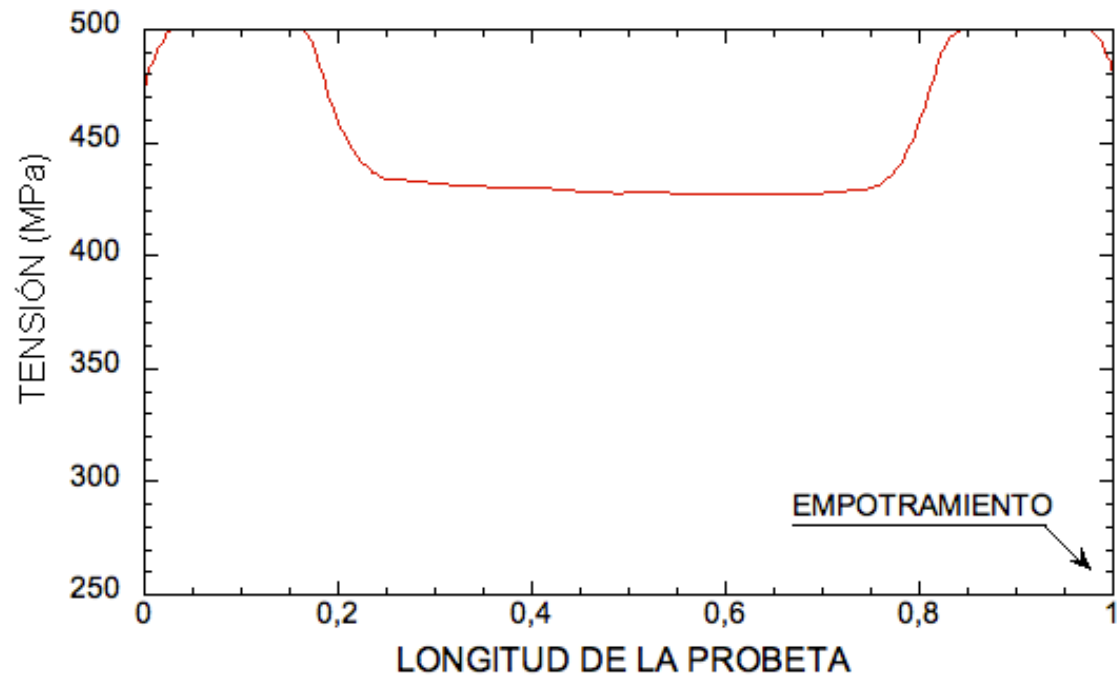


Fig. 6.24. Tensión a lo largo de una probeta sin entalla con $V=10$ m/s.

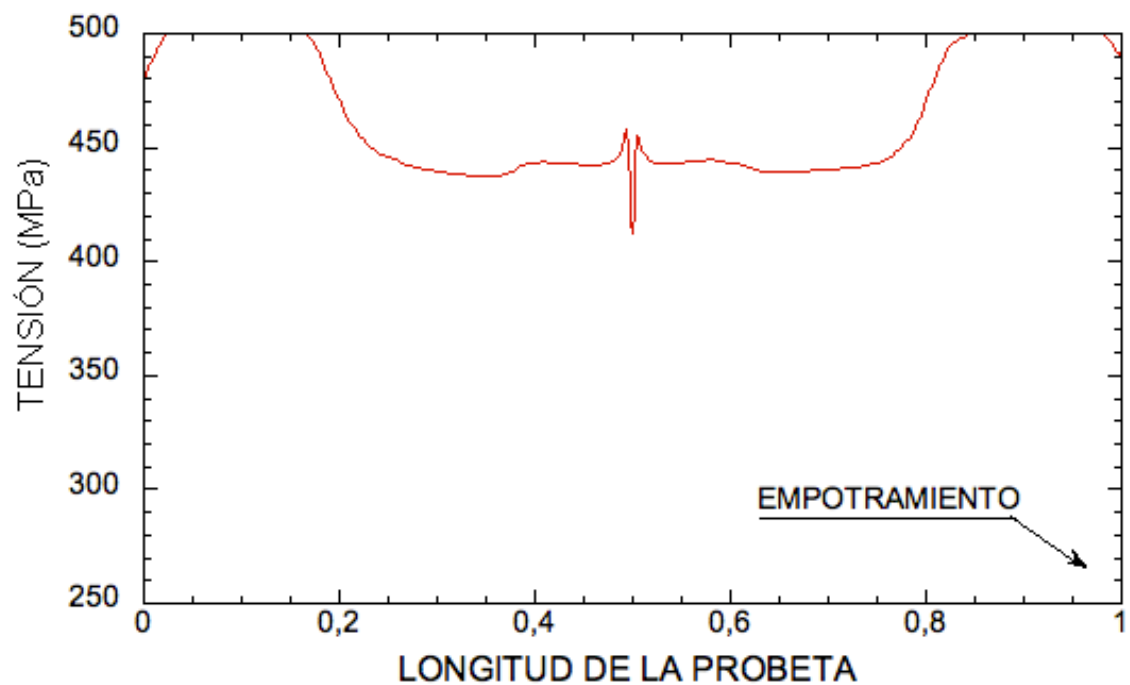


Fig. 6.25. Tensión a lo largo de una probeta con entalla del 5% con $V=10$ m/s.

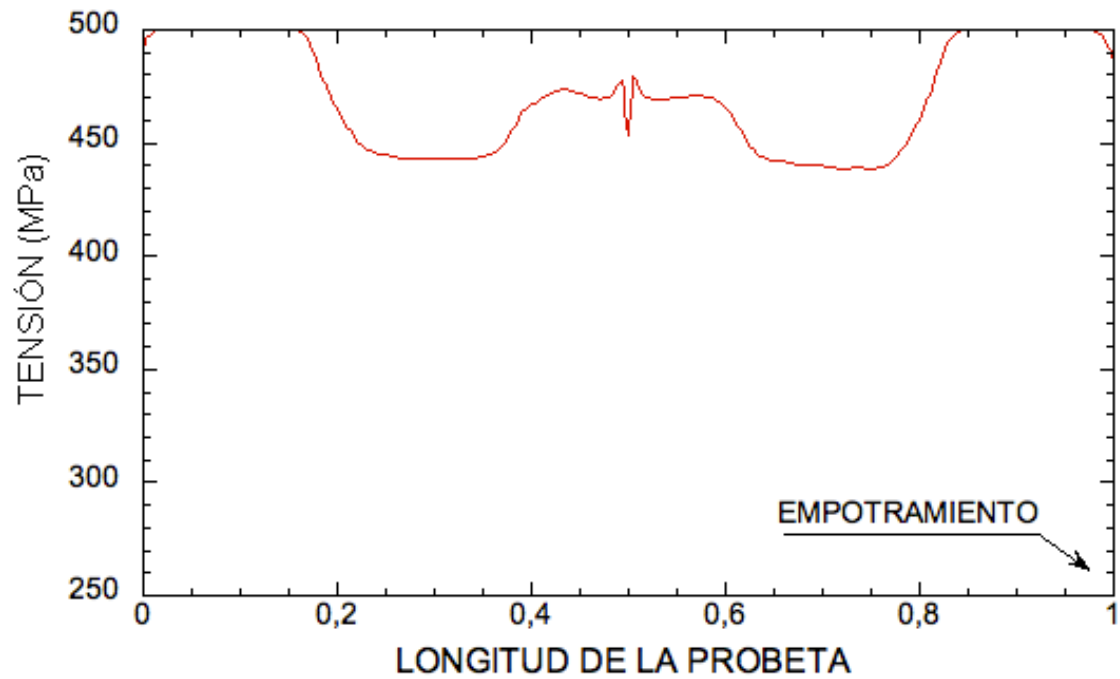


Fig. 6.26. Tensión a lo largo de una probeta con entalla del 6% con $V=10$ m/s.

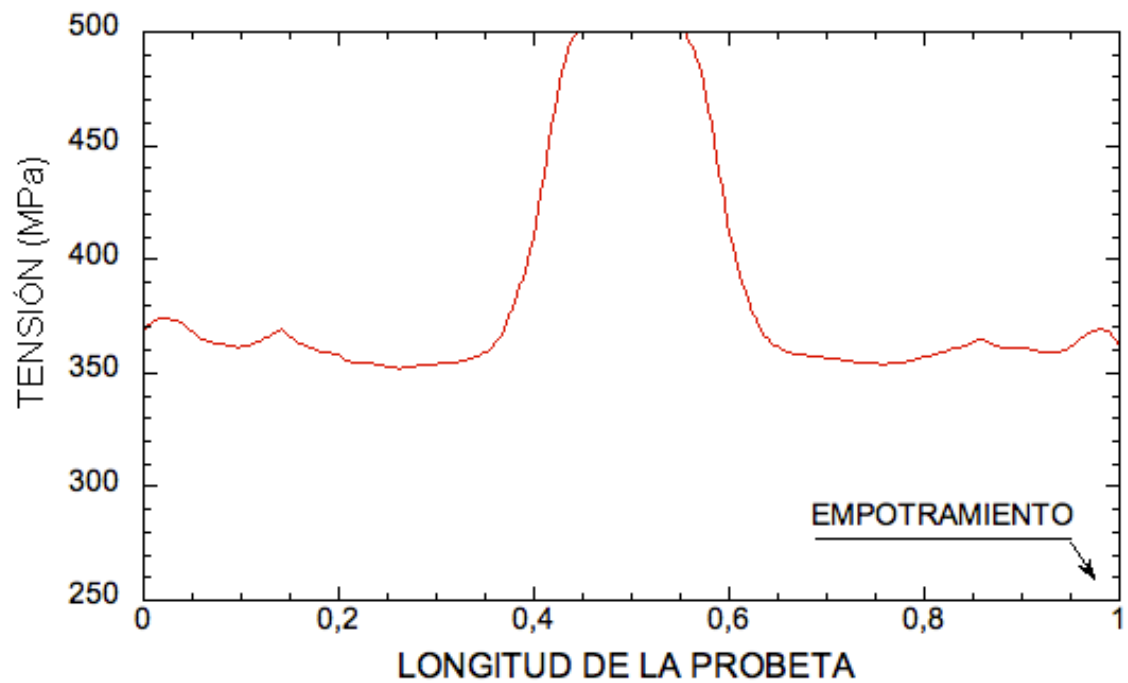


Fig. 6.27. Tensión a lo largo de una probeta con entalla del 7% con $V=10$ m/s.

Una entalla en una probeta es capaz de cambiar por completo tanto las gráficas de tensión como las gráficas de deformación, como ha podido comprobar en las figuras anteriores. Se observa como al ir aumentando el tamaño de la entalla ésta tiene mayor influencia en las gráficas, llegando a tener en la entalla del 7% la mayor inestabilidad de la probeta, ya que de una deformación nula en la probeta sin entalla, pasa a tener una deformación muy notoria.

Cómo se observa en las gráficas de la tensión, cuando una probeta no rompe por la entalla la tensión en ella baja drásticamente, notando que en esa zona existe un concentrador de tensiones.

La influencia de la entalla en las gráficas de tensión-deformación no es muy importante pero aún así se puede observar en la figura 6.28 cómo para las probetas sin entalla la deformación producida en la probeta antes de romper es menor que para las probetas con entalla, para una velocidad similar en ambas simulaciones.

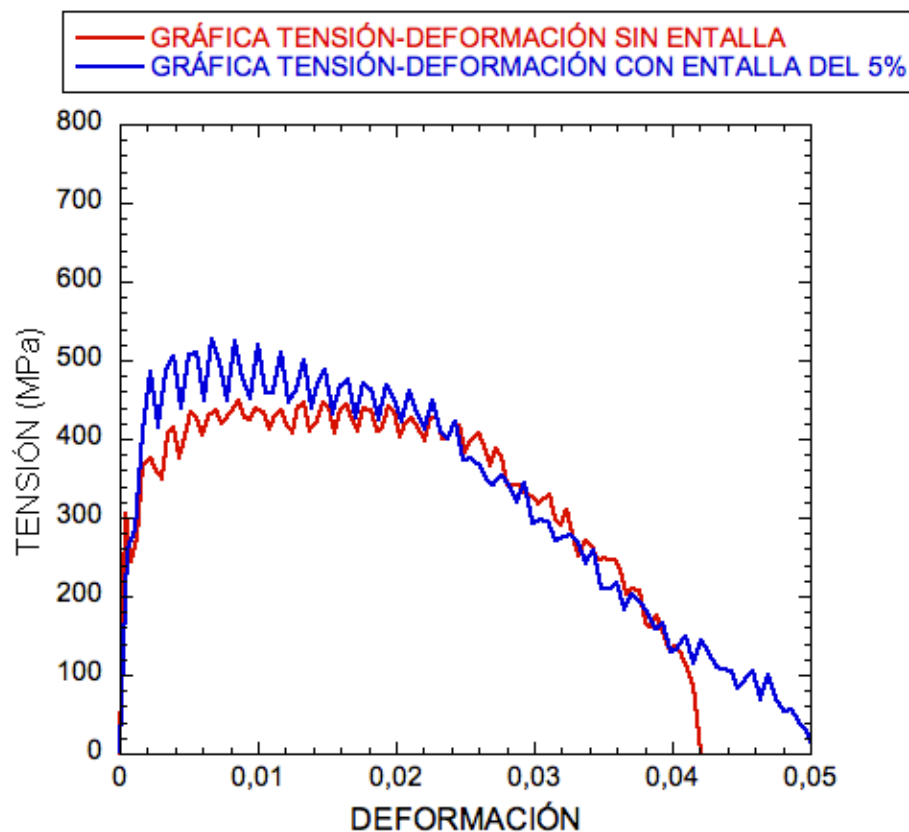


Fig. 6.28. Comparativa de las curvas tensión-deformación con $V=10$ m/s.

7. DISCUSIÓN

La existencia de una entalla en una probeta, produce cambios significativos en la localización de las inestabilidades, en la deformación de la probeta y en la curva tensión-deformación, pero como se ha demostrado, esto no implica que una probeta rompa por la entalla, ya que para velocidades lo suficientemente altas, la probeta romperá fuera de la entalla, tanto para condiciones de carga como para condiciones iniciales.

La diferencia que existe entre unas condiciones iniciales y unas condiciones de carga, a la hora de la localización de las inestabilidades, se aprecia en la figura 7.1. En ella, se observa cómo para unos mismos tamaños de entalla, la velocidad necesaria para que la probeta rompa fuera de la entalla es menor para las probetas con condición de carga. Este fenómeno sólo es válido para entallas menores del 8%, ya que para entallas de mayor tamaño, la velocidad necesaria para que la probeta rompa fuera de la entalla es superior a las estudiadas en el proyecto.

Para probetas con condiciones iniciales, se observa que la relación que existe entre el tamaño de la entalla y la velocidad de carga es lineal, por lo podemos deducir por donde romperá la probeta entre los tamaños de entalla del 1% al 7%.

Para probetas con condiciones de carga, se observa que existe una relación exponencial entre el tamaño de la entalla y la velocidad de carga.

Debido al comportamiento de las probetas para ambas condiciones se puede deducir que existirá un tamaño de entalla a partir del cuál la velocidad máxima de rotura para probetas con condición de carga sea mayor que para probetas con condición inicial.

El modo de introducir la velocidad, ya sea bajo condiciones de carga o bajo condiciones iniciales, es muy importante, porque como se aprecia en la figura 7.1 puede modificar notablemente sus resultados

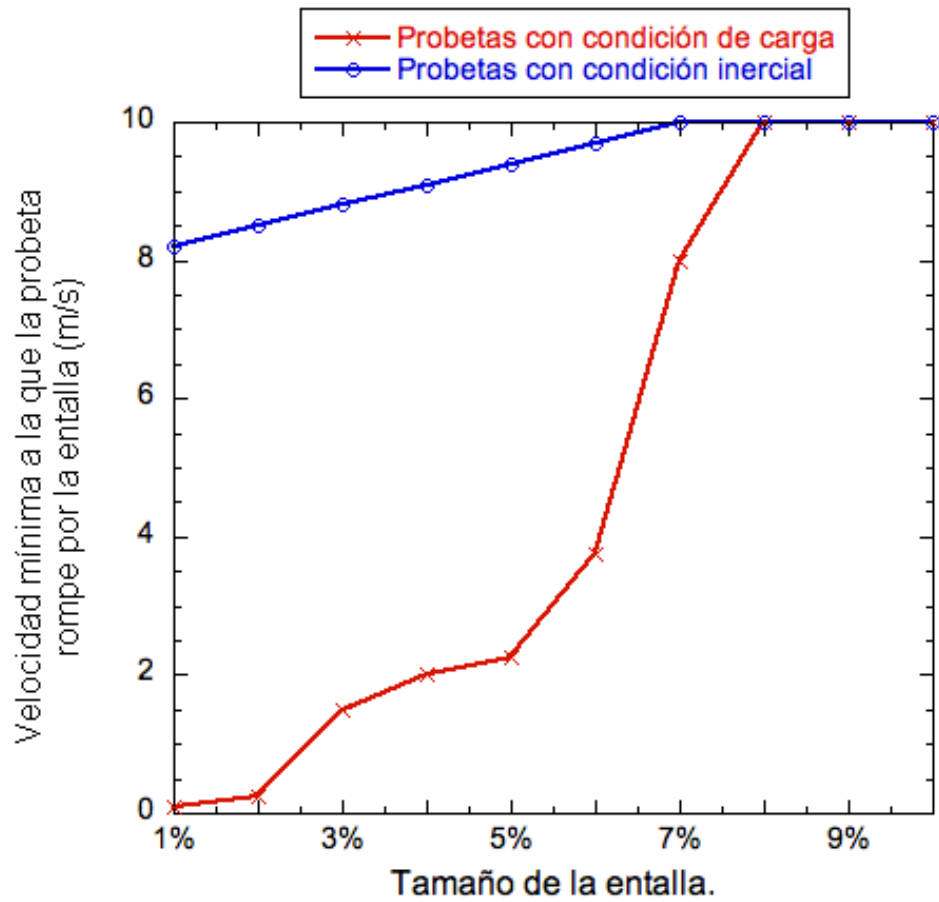


Fig. 7.1. Velocidad máxima a la que una probeta con entalla rompe por la misma.

Tanto para condiciones iniciales como para condiciones de carga, la rotura de la probeta se producirá por tres lugares concretos: el centro, y los dos extremos de la probeta.

Las tres zonas donde la probeta rompe son las de menor diámetro, esto se debe a que la ecuación de la tensión es inversamente proporcional al área, ya que:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad \text{donde:}$$

“F” es la fuerza introducida en la probeta.

“A” es el área en la sección estudiada.

Como existe una diferencia en el área y la fuerza que se genera en la probeta al introducir una velocidad es igual para toda la probeta, siempre se generarán mas tensiones en la zona donde tengamos un diámetro menor.

La rotura que sufre la probeta tanto por los extremos como por el centro se debe a que existe un cambio de sección o una entalla que provoca la creación de un concentrador de tensiones. Éste produce que la tensión que soporta la pieza sea inferior.



Fig. 7.2. Zonas de rotura de la probeta.

Existe una gran diferencia en el aumento de las tensiones entre las probetas con condición de carga y las probetas con condición inicial, ya que mientras en unas la tensión proviene de un extremo de la probeta, la otra comienza con la misma fuerza en toda la probeta

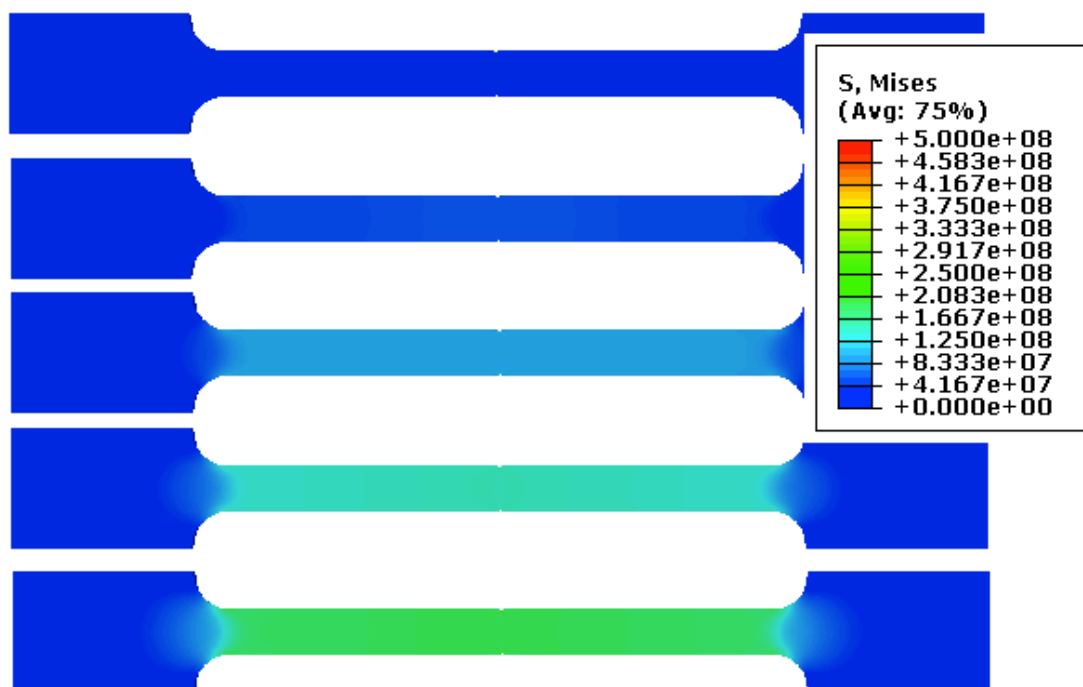


Fig. 7.3. Aumento de la tensión en probetas con condición inicial para una velocidad de 10 m/s.

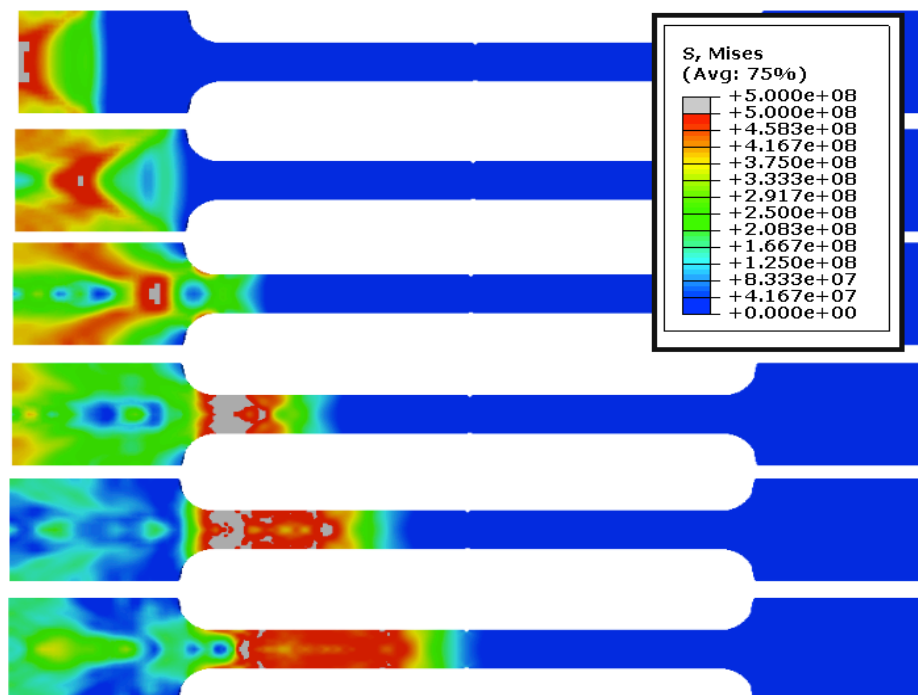


Fig. 7.4. Aumento de la tensión en probetas con condición de carga para una velocidad de 10 m/s.

En las figuras 7.3 y 7.4 se puede apreciar las diferencias entre condición de carga y condición inicial a la hora de formarse las tensiones. Además de la diferencia de que una comienza en un extremo y la otra en toda la probeta, se observa que para la probeta con condición de carga es más rápido alcanzar la tensión de 500 MPa, para la misma velocidad inicial.

La deformación que se realiza a lo largo de una de probeta puede variar dependiendo de la velocidad de carga y dependiendo del tamaño de la entalla. Además de los dos parámetros anteriores, el tipo de carga que introducimos en la probeta puede modificar también la deformación producida.

Como se puede observar en las siguientes imágenes (fig. 7.5 y fig. 7.6), las diferencias entre condición de carga y condición inicial en la deformación a lo largo de la probeta se produce cuando se comparan probetas con distinta zona de rotura, mientras que si comparten la zona de rotura, la gráfica de deformación a lo largo de una probeta será la misma.

En la figura 7.5 se muestra la deformación para una velocidad de 10 m/s con entalla del 6%. En este caso la probeta con condición de carga tiene mayores inestabilidades en un extremo de la probeta, mientras que la probeta con condición inicial tiene mayores inestabilidades en dos extremos de la probeta a la vez, por lo que las curvas de la deformación difieren entre si.

En la figura 7.6 se muestra la deformación para una velocidad de 1 m/s con entalla del 3%. Para este caso tanto la probeta con condición de carga como la probeta con condición inicial tiene mayores inestabilidades en el centro de la probeta. En esta figura se puede observar cómo, cuando el punto de inestabilidades coinciden para ambos casos, la deformación a lo largo de la probeta es similar.

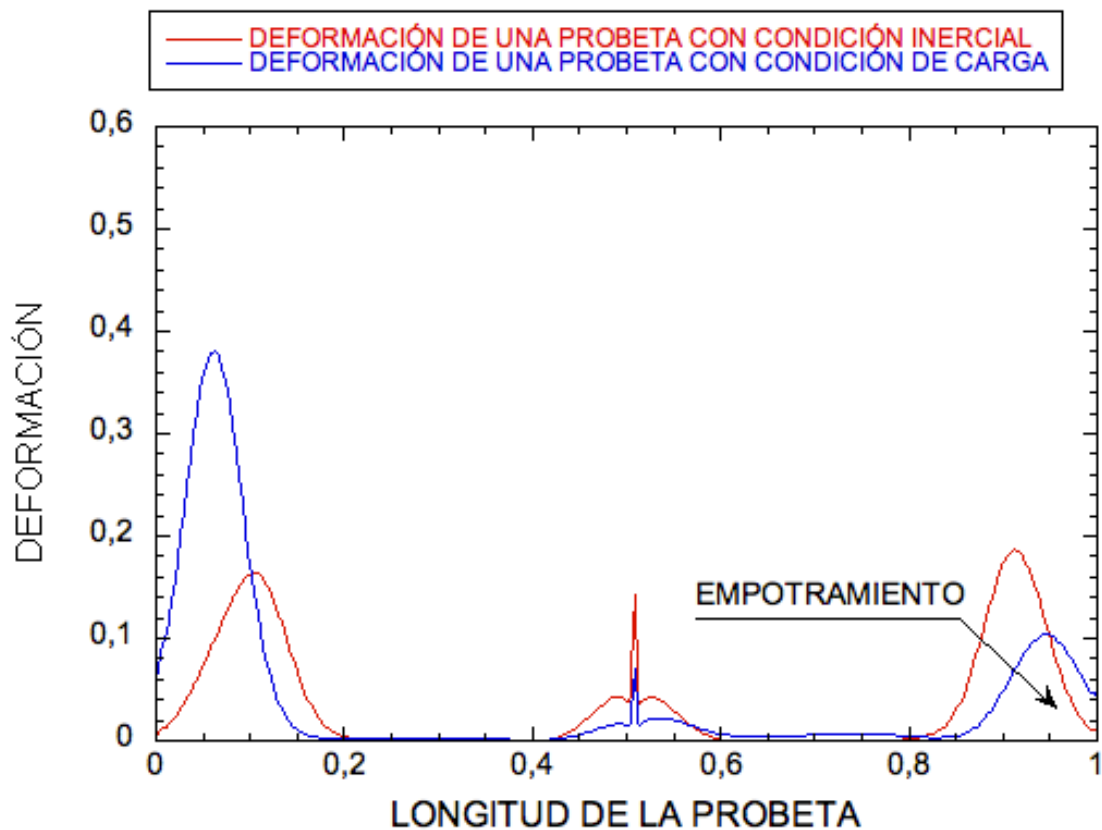


Fig. 7.5. Deformación a lo largo de una probeta con entalla 6% con $V=10$ m/s.

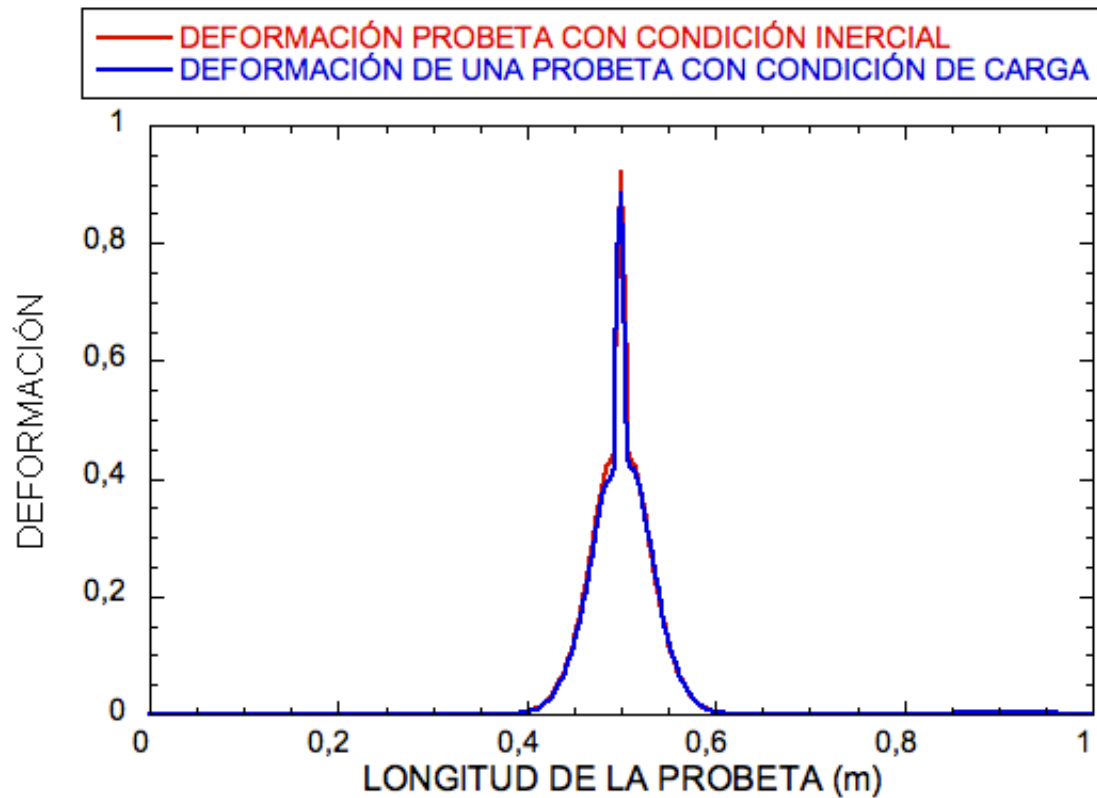


Fig. 7.6. Deformación a lo largo de una probeta con entalla del 3% con $V=1$ m/s.

En las curvas tensión-deformación de la figura 7.7 al igual que en la curva de deformación, existe gran similitud entre condición de carga y condición inicial. Esto se debe a que para ambas gráficas la velocidad es la misma. Como diferencia fundamental se observa como para la probeta con condición de carga, la tensión necesaria para conseguir una deformación siempre es menor que para la probeta con condición inicial.

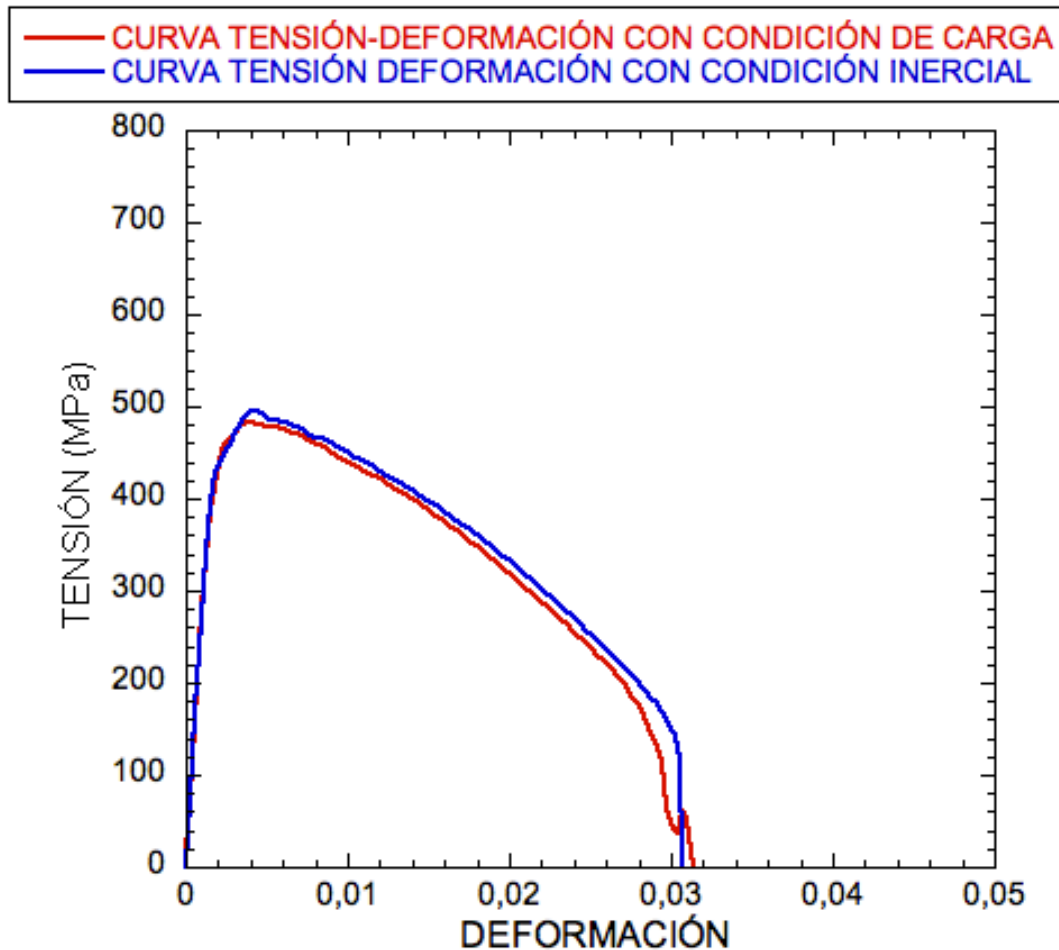


Fig. 7.7. Curva tensión-deformación para probeta sin entalla con $V= 1$ m/s.

Para finalizar hay que comentar que los estudios realizados ha revelado que la formación de inestabilidades puede llegar a realizarse fuera de la entalla, por lo que la presencia de un punto de concentración de tensiones no será necesariamente el punto por el que la probeta rompa.

8. CONCLUSIONES

Durante este proyecto se han llevado a cabo simulaciones de tracción dinámica para probetas con condición de carga y para probetas con condición inicial con o sin entalla. Las principales conclusiones obtenidas en el proyecto se puede resumir de la siguiente forma:

- La ubicación de las inestabilidades es determinista y no aleatoria.

Tanto en probetas metálicas sin entalla como con entalla, dados unos parámetros de carga iniciales, es posible encontrar la ubicación de las inestabilidades plásticas del material. Para la industria esta conclusión es muy importante ya que se podrá predecir la ubicación de las inestabilidades y poder así evitar la rotura de piezas de forma catastrófica.

- La presencia de fuertes imperfecciones no determina el lugar de inicio de la inestabilidades.

Las simulaciones realizadas en este proyecto demuestran que la presencia de fuertes imperfecciones geométricas en materiales metálicos sometidos a cargas de tracción dinámica, no determina que las inestabilidades y posterior rotura se produzcan por la entalla, ya que, para altas cargas la rotura de la probeta puede llegar a hacerse fuera de la entalla.

- La presencia de imperfecciones puede modificar la deformación en la probeta.

La deformación plástica producida en probetas metálicas con diferentes entallas sometidas a cargas similares puede variar, ya que, dependiendo del tamaño de la entalla, la rotura puede producirse fuera o dentro de la misma provocando así las distintas deformaciones en la probeta.

- El modo de introducir la velocidad en la probeta puede modificar el lugar de la formación de las inestabilidades.

A la hora de introducir cargas en la probeta, ya sea bajo condición de carga o bajo condición inicial, existe una diferencia significativa en la localización de las inestabilidades, ya que para una misma velocidad la ubicación varía de lugar.

9. TRABAJOS FUTUROS

El estudio sobre inestabilidades plásticas producidas en probetas metálicas sometidas a tracción dinámica no ha concluido. Existen puntos en los que sería aconsejable seguir el estudio.

Algunas de las líneas que se pueden abordar como continuación a este trabajo fin de grado son:

- Condición de carga: en el proyecto se ha utilizado una velocidad fija para la condición de carga, pero en la realidad la velocidad no se mantiene constante en el tiempo sino que disminuye o aumenta debido al equipo utilizado. Tener una velocidad real modificará los resultados obtenidos en el proyecto.
- Cambiar condiciones externas: Se podría añadir una temperatura de trabajo exterior alta, viendo como ésta modifica los resultados obtenidos.
- Cambiar el tipo de material: la modificación del tipo de material en todas nuestras simulaciones sería otro punto a estudiar.

10. REFERENCIAS

Rittel D., Rotbaum Y., Rodríguez-Martínez J. A., Sory d., Zaera R. Dynamic necking of notched tensile bars: An experimental study. 2013

Rodríguez-Martínez J. A., Rusinek A., Arias A. Relation between strain hardening of steel and critical impact velocity in tension. 2009

Rodríguez-Martínez J. A., Vadillo G., Zaera R., Fernández-Sáez J. On the complete extinction of selected imperfection wavelengths in dynamically expanded ductile rings. Mechanics of Materials. 2013.

Altenhof W., Zamani N, North W., Arnold B. Dynamic stress concentrations for an axially loaded strut at discontinuities due to an elliptical hole or double circular notches. 2004.

Inglis C. E. Stresses in a plate due to the presence of cracks and Sharp corners. 1913

Coker E. G. The Effects of Holes and Semi-Circular Notches on the Distribution of Stress in Tension Members. 1912-1913

Coker E. G., Chakko K. C., Satake Y. Photoelastic and strain measurements of the effects of circular holes on the distribution of stress in tension members. 1919-1920

Nakayama N., Ohashi M., Takeishi H. Dynamic stress concentration in a strip plate with fillet. 1998.

Neuber H. Zur theorie der technischen formzahl, Forschung im Ingenieurwesen 1936.

Neuber H. Theory of notch stresses. Springer, Berlin. 1958.

Peterson R. E. Stress-Concentration Phenomena in Fatigue of Metals. 1933.

Peterson R. E. Stress Concentration Design Factors. John Wiley and Sons, New York, 1953.